Legge Regionale 1

Norme per il governo del territorio

Linee guida per l'edilizia in legno in Toscana

REGIONE TOSCANA

Giunta regionale
Direzione generale della Presidenza
Area di coordinamento Programmazione e controllo

Settore Strumenti della valutazione integrata e dello sviluppo sostenibile

REGIONE
TOSCANA

Linee guida per l'edilizia in legno in Toscana

"LINEE GUIDA PER L'EDILIZIA IN LEGNO IN TOSCANA"

Gruppo di lavoro
Regione Toscana
Facoltà di Ingegneria di Firenze - Dipartimento Ingegneria Civile e Ambientale
C.N.R. Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree (CNR-IVALSA)

Coordinamento del progetto
Arch. Pietro Novelli
Regione Toscana D.G. Presidenza
Settore Strumenti della Valutazione integrata e dello Sviluppo Sostenibile
Responsabile P.O. "Sostenibilità dello Sviluppo Locale"

Con la collaborazione di
Arch. Riccardo Pozzi
Comune di Firenze - Direzione Ambiente
Responsabile Ufficio Città Sostenibile

Coordinamento generale dell'opera
Ing. Maurizio Follesa, Ing. Marco Pio Lauriola, *Timber Engineering, Studio Deda*

Autori del presente volume
Dott. Stefano Berti, *CNR-IVALSA*
Dott. Michele Brunetti, *CNR-IVALSA*
Prof. Pietro Capone, *Facoltà di Ingegneria di Firenze*
Ing. Erica Ciapini, *Libero Professionista*
Ing. Claudia Fedrigo, *Facoltà di Ingegneria di Trieste*
Ing. Maurizio Follesa, *Timber Engineering, Studio Deda*
Ing. Marco Pio Lauriola, *Timber Engineering, Studio Deda*
Dott. Paolo Lavisci, *LegnoPiù*
Dott. Nicola Macchioni, *CNR-IVALSA*
Arch. Giuseppe Palanga, *Studio Deda*
Dott. Sabrina Palanti, *CNR-IVALSA*
Ing. Benedetto Pizzo, *CNR-IVALSA*
Arch. Marco Terranova, *Studio Deda*
Ing. Salvatore Vasta, *CNR-ITAE*, *Studio Deda*
Prof. Andrea Vignoli, *Facoltà di Ingegneria di Firenze*

Si ringraziano per l'opera di revisione del testo:
Ing. Maurizio Baudone, *LAMMA Regione Toscana*
Prof. Gianni Bartoli, *Facoltà di Ingegneria di Firenze*
Arch. Giuseppina Bocchini, *Provincia di Arezzo*
Ing. Rosario Carbè, *Libero Professionista*
Arch. Mauro Carbonari, *Comune di Rignano sull'Arno*
Dott. Carlo Chiostri, *ARSIA Regione Toscana*
Arch. Vincenzo Esposito e i Tecnici di *Casa SPA*
Prof. Marco Fioravanti, *Facoltà di Sc. Forestali di Firenze*
Per. Agr. Benito Follesa, *Timber Engineering*
Ing. Giuseppe Garofalo, *ARKETIPO Workgroup*
Ing. Luca Gori, *Genio Civile di Firenze*
Geom. Matteo Lauriola, *Timber Engineering*
Ing. Francesco Marinelli, *StudioBios*
Arch. Antonio Miniati, *Comune di Fabbriche di Vallico*
Ing. Giuseppe Moschi, *TS Ingegneria*
Dott. Mario Moschi, *Libero Professionista*
Prof. Maurizio Orlando, *Facoltà di Ingegneria di Firenze*
Dott. Daniele Perulli, *Regione Toscana*
Prof. Marco Togni, *Facoltà di Sc. Forestali di Firenze*
Arch. Elisabetta Vannini, *INBAR*
Dott. Giovanni Vignozzi, *Regione Toscana*
Prof. Roberto Zanuttini, *Facoltà di Agraria di Torino*

Impaginazione
Ing. Laura Calabri, Ing. Ilaria Castellacci, *Timber Engineering*

Stampa
Centro stampa Giunta Regionale Toscana

Edizioni Regione Toscana - 2009
Distribuzione gratuita
Stampato in carta da edizioni ecologica

In copertina: Centro Sociale di Rignano sull'Arno, progetto Legnopiù Srl con il supporto scientifico di ARSIA e CNR-IVALSA, 2008

Claudio Martini

Presidente Regione Toscana

PREFAZIONE

La Toscana, con 1,1 milioni di ettari di bosco, è la regione più verde d'Italia: oltre il 50% del territorio se ci riferiamo all'intera superficie, e oltre il 60% se si considerano solo le aree collinari e montane.
Le foreste toscane assolvono a molte importanti funzioni: economica, turistica, produttiva, ecologica, paesaggistica ed ambientale.
Per curare, valorizzare e gestire questo enorme patrimonio, ogni anno dedichiamo oltre 14 milioni per gli interventi ordinari, a cui si aggiungono poi i finanziamenti per le manutenzioni straordinarie.
Anche grazie a questo investimento, il settore delle utilizzazioni boschive – che va dalla vendita del legname alla realizzazione di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili – nonostante le difficoltà che ancora rimangono, è in crescita. Ma potrebbe crescere ancora di più se il settore dell'edilizia facesse quel salto di qualità che gli consentirebbe di essere più conosciuto ed utilizzato. Oltre al beneficio economico, questo comporterebbe anche un beneficio ambientale: i nostri boschi, che negli ultimi 100 anni hanno aumentato di tre volte la loro estensione, sarebbero più puliti, sicuri, fruibili.
L'obiettivo della presente pubblicazione "Linee Guida per l'edilizia in legno in Toscana" è proprio questo: far conoscere a tutti i soggetti interessati, una tecnologia innovativa e di qualità che, attraverso l'utilizzo di una materia prima naturale ed ecologica come il legno, valorizzi e faccia crescere l'edilizia sostenibile per lo sviluppo del nostro territorio.
Come il lettore potrà scoprire, sono molti i punti di forza per sostenere l'edilizia in legno: il risparmio energetico nella fase di costruzione e in quella di utilizzo degli edifici, la riduzione dell'utilizzo di fonti non rinnovabili, la durata delle costruzioni, il comportamento nei casi di eventi sismici (ma anche – diversamente da quello che si pensa – nei confronti del fuoco), la velocità di costruzione, il risparmio economico.
Il tema è di estremo interesse, e potrebbe rappresentare una piccola rivoluzione nel settore della edilizia per realizzare, con tempi e costi certi, edifici ecoefficienti, sicuri, confortevoli.
Auguro a tutti una piacevole lettura.

Eugenio Baronti

Assessore alle Politiche per l'Edilizia Residenziale Sostenibile
Regione Toscana

PREFAZIONE

La Toscana, di fronte a questa grave crisi finanziaria, economica, sociale, ambientale globale, ha reagito con grande determinazione e tempestività mettendo in campo tutte le energie, le competenze umane e le risorse finanziarie di cui dispone per costruire le prospettive strategiche per una fuoriuscita dalla crisi attraverso azioni di riconversione e riqualificazione del nostro modello di sviluppo.
Uno dei pilastri per ridisegnare uno sviluppo qualitativo passa proprio attraverso una grande azione di riqualificazione del nostro sistema edilizio tra i meno ecoefficienti d'Europa che consuma la fetta più consistente di energia, oltre il 40%, e rilascia nell'aria il 50% dell'inquinamento atmosferico. Attraverso una grande azione di riqualificazione si possono ottenere grandi benefici ambientali, economici, far crescere nuove professionalità e competenze, incrementare l'occupazione e produrre nuova ricchezza sociale.

L'edilizia ecosostenibile può rappresentare un volano importante per una ripresa che va nella direzione giusta, quella di costruire, per noi e per le future generazioni, un futuro sostenibile.
Inoltre il settore edile è un settore strategico anche per perseguire gli obiettivi definiti nel Protocollo di Kyoto poiché l'energia necessaria alla realizzazione ed alla gestione climatica dell'ambiente costruito rappresenta oggi la parte principale dei costi energetici del paese.

L'obiettivo è quello di modificare l'attuale rapporto tra la qualità dell'ambiente antropizzato, le esigenze della produzione nel settore edilizio e la necessità di creare strutture abitative che garantiscano il benessere e la salute dei cittadini.
Si tratta di reinterpretare in un modo innovativo il modo di progettare e realizzare la struttura urbana ed i singoli contenitori edilizi, tenendo in particolare conto il comfort e la salute di chi andrà poi a fruire quello spazio realizzato, ma anche i temi del rispetto dell'ambiente, e della economia e la necessità di affermare una nuova cultura dell'abitare capace di ripensare spazi per favorire le relazioni umane, lo scambio solidale e mutualistico di servizi, il fare comunità per sconfiggere una condizione diffusa di solitudine.
L'edilizia ecosostenibile è una metodologia per affrontare strategicamente il tema dell'adattamento ai mutamenti climatici coniugando lo sviluppo con l'ambiente nei settori della pianificazione territoriale, urbanistica ed edilizia.

La Giunta regionale toscana è stata la prima amministrazione regionale ad assumere provvedimenti legislativi per incentivare lo sviluppo di una Edilizia sostenibile nel quadro più ampio degli impegni assunti verso uno Sviluppo sostenibile del proprio territorio.
L'obiettivo è quindi quello di rendere praticabile e conveniente per tutti gli attori del processo edilizio la introduzione di tecnologie innovative e di contenuti di qualità negli edifici di nuova produzione, individuando anche sistemi per riqualificare il patrimonio edilizio esistente.
L'Edilizia, nel passaggio da una attività artigianale con forti connotazioni culturali e di esperienza tramandata da una generazione all'altra, ad una attività industriale fortemente standardizzata, ha perduto quei riferimenti che consentivano la ottimizzazione delle risorse disponibili su quel particolare territorio, e che caratterizzavano le scelte di progettazione e di realizzazione che risultavano adeguate alle tradizioni del luogo di insediamento.

Oggi è necessario fare tutti uno sforzo per riscoprire le tecniche ma anche i contenuti culturali e storici che hanno consentito, in Toscana, di mettere in sintonia il territorio con l'opera dell'uomo. La nostra azione deve essere guidata da quel sapere antico che ha contribuito a plasmare nei secoli i nostri splendidi paesaggi rurali, i nostri borghi e le nostre città, realizzando uno dei paesaggi antropizzati più apprezzati al mondo e che rappresenta una delle risorse più importanti di cui disponiamo.
La ricerca di questa armonia tra ambiente naturale e settore delle costruzioni è l'essenza della Edilizia Sostenibile che la Amministrazione regionale toscana ha individuato come strumento strategico per uno sviluppo qualitativo del territorio.

Le tecnologie moderne relative all'utilizzo del legno in edilizia appaiono orientate a perseguire i medesimi obiettivi, ed è quindi auspicabile che le loro caratteristiche vengano apprezzate dagli operatori del settore e dagli utilizzatori finali, in particolare la durabilità delle costruzioni, le caratteristiche bioclimatiche e l'ottimo comportamento delle strutture lignee nei confronti degli eventi sismici.

Sul piano della sostenibilità, il legno appare, tra i materiali da costruzione, di particolare interesse poiché è rinnovabile e riciclabile; consuma pochissima energia nelle fasi di produzione e posa in opera; non rilascia emissioni, polveri o fibre nocive durante l'impiego; inoltre a fine utilizzo si smaltisce senza inquinare e può restituire l'energia accumulata se viene impiegato per la termovalorizzazione.
Il consumo di energia primaria necessaria per la produzione dei componenti in legno è enormemente inferiore (si calcola del 75% in meno) dei componenti ordinariamente utilizzati in edilizia. Questa enorme differenza deriva dall'esigenza per i materiali tradizionali di cicli produttivi ad alto assorbimento di combustibili fossili che per il legno non sono necessari.
Inoltre come evidenziato dall'Unione Europea nel Sesto Programma di Azione Ambientale a ogni metro cubo di legno impiegato in edilizia corrisponde quasi 1 tonnellata di CO_2 che viene stoccata, per tutta la durata di vita dell'edificio e quindi svolge un ulteriore importante ruolo nell'attenuazione dei mutamenti climatici in atto.
L'uso di questa tecnologia innovativa con un materiale che è indiscutibilmente tradizionale, appare come una reale novità nello scenario dei processi produttivi edilizi e per la sicurezza degli edifici, la certezza dei tempi di realizzazione e conseguentemente dei costi degli interventi, ha tutte le condizioni per diventare la tecnologia di riferimento per la realizzazione di edifici di ad uso pubblico o ad uso residenziale pubblico.

Questo particolare settore del mercato immobiliare deve oggi rispondere a criteri di basso impatto ambientale ed alta efficienza energetica ma deve anche essere sufficientemente flessibile per consentire la sperimentazione di materiali, tecniche e sistemi costruttivi innovativi che rispondano a nuove esigenze come ad esempio l'autocostruzione.

Infine queste tecnologie consentono di sperimentare una nuova offerta edilizia, che potrebbe favorire la costituzione di una industria del legno strutturale toscano, oltre ad offrire nuove opportunità imprenditoriali locali e consentire di sviluppare servizi professionali innovativi e nuove opportunità per maestranze qualificate.
Una richiesta di mercato stabilizzata, ed un ciclo produttivo definito, consentirebbe una corretta programmazione della offerta di materie prime, con la conseguente tutela e valorizzazione del patrimonio boschivo delle montagne della Toscana.

Grande apertura mentale, creatività, curiosità e disponibilità all'innovazione, con questo approccio possiamo vincere la sfida dell'ecoefficienza energetica del nostro sistema edilizio, cercando di mettere in rete in un progetto multidisciplinare coordinato ed integrato tutte le conoscenze, le competenze di cui disponiamo per promuovere ricerca, trasferimento tecnologico, innovazione, per realizzare la casa ecosostenibile del futuro per una regione che si colloca nel bacino del mediterraneo, evitando il semplice trasferimento nella nostra regione di tecniche, tecnologie e materiali pensate e realizzate in Europa soprattutto del Nord in condizioni metereologiche e culturali completamente diverse. Dobbiamo accelerare il passo per recuperare il tempo perduto e dunque promuovere, facilitare la realizzazione di interventi innovativi di progettazione, ristrutturazione e manutenzione del patrimonio edilizio pubblico e privato, che perseguano obiettivi di ecoefficienza energetica ed ambientale consentendo così una sempre migliore qualità di vita dei toscani sempre nel rispetto della sostenibilità.

Indice

INTRODUZIONE: SCOPO DEL LAVORO E AMBITI APPLICATIVI 9

1 - GESTIONE DELLA RISORSA LEGNO..... 13

1.1 La gestione forestale sostenibile 13
1.2 Certificazione di buona gestione forestale 16
1.3 La realtà forestale toscana e le nuove opportunità di approvvigionamento 19

2 - ELEMENTI DI TECNOLOGIA DEL LEGNO..... 23

2.1 Caratteristiche fondamentali del materiale legno 23
2.2 Umidità, stagionatura e problemi legati ai movimenti del legno 30
2.3 Difetti e caratteristiche meccaniche del legno strutturale 33
2.4 Classificazione del legno strutturale 39
2.5 Degradamento biologico: durabilità naturale, prevenzione e trattamenti preservanti 44
2.6 Degradamento da Agenti non biologici 54

3 - LEGNO E MATERIALI A BASE DI LEGNO 57

3.1 Legno massiccio, elementi incollati a sezione intera, elementi a 2-3 lamelle 57
3.2 Legno lamellare incollato 62
3.3 Pannelli a base di legno 67
3.4 Pannelli di legno massiccio a strati incrociati 73
3.5 Materiali accessori 78
3.6 Qualificazione di prodotti e produttori, marcatura CE 82

4 - RIFERIMENTI NORMATIVI E ASPETTI LEGATI ALLA PROGETTAZIONE 87

4.1 Premessa: il quadro normativo passato, attuale e futuro 87
4.2 La situazione in Italia: Norme Tecniche e Istruzioni CNR 91
4.3 La situazione in Europa: gli Eurocodici 98
4.4 I regolamenti edilizi comunali ed il loro rapporto con l'edilizia in legno 103
4.5 Principi di progettazione delle strutture di legno 107
4.6 Unioni e tipologie di collegamento 125
4.7 Comportamento sismico delle strutture di legno 141
4.8 Comportamento al fuoco delle strutture di legno 156

5 - EDIFICI A STRUTTURA DI LEGNO 163

5.1 Sistemi costruttivi: tipologie, caratteristiche e comportamento strutturale 163
5.2 Sistemi costruttivi: comportamento strutturale e metodo di calcolo 179
5.3 Gli edifici per l'edilizia residenziale. Dagli edifici monofamiliari ai condomini multipiano 190
5.4 Gli edifici pubblici 202
5.5 Autocostruzione e autorecupero 211
5.6 Progettare la durabilità 220
5.7 Pareti, solai e coperture: tipologie, sezioni e particolari costruttivi 228
5.8 Isolamento termo-acustico e risparmio energetico. LCA 234
5.9 Sistemi tecnologici impiantistici integrati 253
5.10 Il montaggio degli edifici a struttura di legno. Aspetti legati alla sicurezza 267
5.11 Redazione dei piani di manutenzione 277
5.12 Criteri di progettazione antincendio di edifici a struttura di legno 285
5.13 Il legno negli edifici esistenti 290
5.14 Voci di capitolato per la realizzazione di edifici a struttura di legno 295

Introduzione

Scopo del lavoro e ambiti applicativi

La Regione Toscana ha da alcuni anni dimostrato una particolare attenzione alle tematiche della sostenibilità in generale e in particolare della ecoefficienza delle costruzioni attraverso iniziative volte ad incentivare l'utilizzo di tecnologie e materiali naturali nell'edilizia residenziale e pubblica. Ne è esempio l'istruzione tecnica prevista all'art. 37 della Legge Regionale 1/2005 ed approvata con delibera n. 322 del 28.02.2005, le *Linee Guida per l'edilizia sostenibile in Toscana*, che è diventato uno strumento di lavoro di riferimento per tutti coloro, amministratori pubblici, tecnici e cittadini che da vari punti di vista si sono trovati ad affrontare il tema della progettazione di edifici che non pesino ulteriormente sullo stato dell'ambiente curandone l'inserimento nel luogo e nella natura circostante ed integrando gli elementi biologici nella costruzione attraverso la scelta di materiali naturali.
Nell'ultimo capitolo delle Linee Guida, "I materiali edili", è presente un paragrafo intitolato "Tre buone ragioni per incrementare l'uso del legno in edilizia" che rappresenta l'ideale trait d'union con questo lavoro, che ha l'ambizione di costituire un utile riferimento per tutti coloro che intendano conoscere, capire e progettare con questo materiale da costruzione antico, in quanto è stato uno dei primi utilizzati dall'uomo, e al contempo nuovo in quanto possiede qualità e possibilità tecnologiche che meglio di qualsiasi altro materiale si sposano con concetti quali sviluppo sostenibile, risparmio ed efficienza energetica.
Le tre ragioni citate, ossia contrastare il cambiamento climatico, proteggere il bosco creando occupazione e risparmiare energia, potrebbero già di per sé rappresentare un motivo sufficiente per suggerire un cambiamento radicale rispetto alle tecniche costruttive tradizionalmente utilizzate nella nostra regione e nel nostro Paese, che per lungo tempo hanno portato a preferire, spesso a torto, l'utilizzo di materiali di origine industriale, ai materiali di origine naturale in virtù della loro supposta superiore durabilità e sicurezza.
In realtà, il processo di trasformazione edilizia del nostro paese verso una maggiore sostenibilità e un uso più equo delle risorse ambientali è già iniziato da qualche anno. E questo parallelamente allo sviluppo della tecnica delle costruzioni in legno e alla crescente diffusione che i sistemi edilizi in legno hanno avuto in tutto il continente europeo e in varie parti d'Italia. Sviluppo che è stato accompagnato da risultati di recenti esperienze tecnico-scientifiche che hanno dimostrato che il legno non è solo un materiale da costruzione naturale e rinnovabile, ma che prima di tutto è sicuro ed economico.
La problematica principale per le amministrazioni pubbliche, come anche per i costruttori privati, in tutti gli interventi di edilizia pubblica e residenziale, è avere garanzie e certezze sul rispetto dei tempi e dei costi. Le strutture di legno rappresentano la risposta ideale a questa esigenza: grazie ad un processo costruttivo relativamente facile ed estremamente veloce che, escluse le fondazioni, è interamente a secco e viene eseguito mediante l'utilizzo di semplice ferramenta metallica, e grazie alla leggerezza del materiale che ne facilita la movimentazione in cantiere, è possibile realizzare edifici anche di dimensioni ragguardevoli e con un elevato numero di piani che soddisfano pienamente i requisiti di sicurezza più severi.
Inoltre la recente approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (DM 14/01/2008) e delle istruzioni CNR per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno (CNR/DT 206: 2007) colmano un vuoto normativo che, nel nostro paese, durava da troppi anni. Nelle Norme Tecniche sono presenti ben tre paragrafi relativi alle strutture di legno, che, insieme alle altre normative di riferimento, forniscono al progettista italiano gli strumenti necessari per progettare con questo materiale con fiducia e tranquillità.
Utilizzare il legno significa rispettare la natura e quindi investire sul futuro. Ma non solo. Ci sono svariate situazioni progettuali nelle quali il legno diventa vincente nel confronto con altri materiali da costruzione proprio grazie alle sue qualità, per certi versi, insospettabili.

SOSTENIBILITÀ

Il valore del legno come materiale da costruzione dal punto di vista ecologico è facilmente comprensibile: proviene da una fonte, gli alberi, il cui rinnovamento e riproducibilità, sono determinati essenzialmente dall'unica sorgente energetica, ad oggi, definibile come illimitata: il sole. Come efficacemente affermato in "Tackle Climate Change: Use Wood", documento realizzato da CEI-BOIS (www.cei-bois.org), il legno svolge un ruolo fondamentale nella lotta al cambiamento climatico; le foreste, producendo legno, riducono la quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera; inoltre, l'utilizzazione del legno genera meno emissioni di CO_2 rispetto a quelle causate utilizzando altri materiali. Ogni metro cubo di legname utilizzato permette di risparmiare emissioni per 1,1 tonnellate di CO_2. Il ruolo fondamentale del legno nella lotta al cambiamento climatico è riconosciuto

anche nel Sesto Programma di azione ambientale dell'UE nel quale si afferma che "*l'uso del legno e dei prodotti derivati dovrebbe essere maggiormente sfruttato sia a livello domestico che industriale in virtù della capacità di questo materiale di assorbire il carbonio*". Utilizzare il legname proveniente da boschi gestiti correttamente significa consentire lo sviluppo delle foreste e non la loro distruzione in quanto si arriva ad asportare una quantità di materiale legnoso inferiore rispetto a quella prodotta annualmente. Secondo il report sullo stato delle foreste nel mondo (FAO 2003), oggi in Europa viene tagliato soltanto il 65% dell'incremento annuale, il resto viene lasciato per lo sviluppo successivo. In questo contesto utilizzare il legno significa quindi creare un indubbio beneficio in termini di economie locali e di occupazione oltre che incentivare l'incremento delle zone boschive e quindi in sostanza salvaguardare il nostro pianeta per le generazioni future.
Tornando a livello regionale, cosa che molti non sanno, l'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio aggiornato al 2005 riporta che la Toscana è la regione d'Italia con la maggiore estensione di superficie boscata, seconda a livello nazionale se si considerano anche gli arbusteti.
L'impiego del legno per le costruzioni significa anche un indubbio beneficio in termini di risparmio energetico. La lavorazione di materiali di costruzione come il calcestruzzo, i mattoni, il vetro o l'acciaio richiede infatti un consumo energetico superiore. Per fare un esempio, per produrre una trave di legno è necessario un sesto dell'energia necessaria per produrre un elemento di resistenza equivalente d'acciaio. Inoltre la costruzione di una casa in legno richiede l'impiego della metà dell'energia necessaria per una costruzione in laterizio o calcestruzzo armato.

ECONOMICITÀ, BENESSERE E BELLEZZA

Dal punto di vista dell'analisi dei costi, una delle principali economie operabili del processo edilizio è la riduzione dei tempi di costruzione. Un edificio di legno, anche di molti piani, è relativamente semplice e veloce da costruire. Essendo il legno un materiale leggero, ogni elemento è facilmente trasportabile e maneggiabile in cantiere; inoltre il montaggio, effettuato interamente a secco mediante l'utilizzo di collegamenti meccanici con piastre di acciaio, viti, chiodi e bulloni, è estremamente veloce.

Figura 1: A sinistra: edificio di due piani realizzato dall'Ing. G. Moschi a Scarperia (FI). Tempo di montaggio delle strutture: 4 giorni. A destra: edificio interamente a struttura di legno di 9 piani realizzato nel 2008 a Murray Grove, Londra su progetto dello studio Waugh-Thistleton. Tempo di realizzazione delle strutture: 9 settimane.

Al contrario di quanto molti pensano, un edificio a struttura di legno non deve necessariamente essere di legno anche nell'aspetto esteriore (vedi Figura 1). In realtà con il legno è possibile realizzare splendide architetture in cui la struttura può essere a vista oppure, come spesso avviene, può essere protetta esternamente con qualsiasi materiale di rivestimento: dall'intonaco, ai mattoni, alla ceramica, all'alluminio, alla pietra o se si preferisce anche con lo stesso legno. Il legno come materiale strutturale si accompagna perfettamente all'utilizzo di materiali naturali per l'isolamento (sughero, fibra o lana di legno) oltre ad essere esso stesso un buon isolante termo-acustico. In un edificio di legno isolato con materiali naturali è possibile raggiungere facilmente, senza incidere in maniera significativa sui costi, i parametri più elevati secondo i sistemi di attribuzione della classe energetica agli edifici.
Condividendo il principio secondo cui "la miglior energia è quella non consumata", all'isolamento termico è possibile aggiungere sistemi tecnologici passivi per la produzione di energia integrati alla struttura architettonica. Gli edifici in legno facilitano il montaggio di elementi tecnologici integrati: realizzata la struttura portante, sia le componenti impiantistiche che di finitura possono essere montate a secco direttamente sul supporto ligneo mediante semplice ferramenta. E cosa ancora più importante, intervenire successivamente per riparare un impianto difettoso è estremamente semplice e veloce.

SICUREZZA

Esistono oramai esperienze scientifiche nazionali e internazionali che testimoniano l'elevato livello di sicurezza di edifici interamente di legno anche di molti piani, cosa già nota in diverse parti del mondo (Nord America, Giappone, Nord Europa) in cui il legno viene normalmente utilizzato e spesso preferito per la realizzazione di

edifici residenziali e pubblici anche di notevole importanza. Proprio in Italia e proprio da un istituto di ricerca con sede principale nella nostra regione, il CNR-IVALSA, sono state svolte ricerche scientifiche sul comportamento strutturale di edifici multipiano in legno che ne hanno dimostrato la eccellente resistenza nei confronti di eventi eccezionali quali il sisma e il fuoco.
Il legno è un materiale non solo adatto, ma addirittura consigliabile per la realizzazione di edifici che si comportano in maniera eccellente nei confronti dei terremoti. Un recente progetto di ricerca italiano finanziato dalla Provincia autonoma di Trento e condotto dal CNR-IVALSA in collaborazione con il National Institute for Earth science and Disaster prevention (NIED) ha portato alla realizzazione di una serie di test su piattaforma sismica sperimentale in Giappone su edifici interamente a struttura di legno di 3 piani (2006) e 7 piani (2007) (vedi Figura 2) che hanno resistito benissimo a terremoti distruttivi quali il terremoto di Kobe del 1995 (Magnitudo 6,9).
Nell'estate del 2009 una prova simile verrà condotta su un altro edificio di 6 piani a struttura di legno, mediante una campagna sperimentale condotta da un consorzio di cinque università americane insieme al già citato giapponese NIED.
Dei progressi della ricerca scientifica nel campo della tecnica delle costruzioni in legno si tiene conto anche nelle Norme Tecniche per le Costruzioni, nelle quali scompaiono le limitazioni di altezza per le costruzioni di legno in funzione della zona sismica presenti nelle normative precedenti.

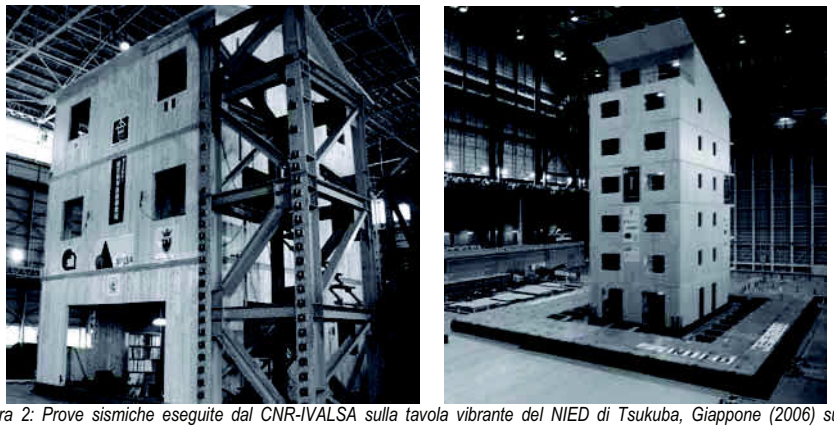


Figura 2: Prove sismiche eseguite dal CNR-IVALSA sulla tavola vibrante del NIED di Tsukuba, Giappone (2006) su un edificio di tre piani e sulla piattaforma sismica sperimentale più grande al mondo, la E-Defence del NIED a Miki nei pressi di Kobe, Giappone (2007) su un edificio di sette piani (fonte www.progettosofie.it).

Al contrario dell'opinione comunemente diffusa e a differenza di altri materiali, il legno ha un ottimo comportamento nei confronti del fuoco (brucia molto lentamente e con velocità nota), migliore di altri materiali quali ad esempio l'acciaio (può sembrare un paradosso ma il punto debole delle strutture di legno nei confronti dell'incendio può essere proprio la presenza di elementi di acciaio non protetti). Una prova di incendio reale condotta nel 2007, sempre nell'ambito dello stesso progetto di ricerca, dal CNR-IVALSA su un edificio di tre piani, durante la quale è stato riprodotto un incendio in una stanza d'albergo posta al primo piano utilizzando un carico di incendio doppio rispetto a quello previsto dalla normativa europea, ha dimostrato che dopo un'ora di incendio le strutture portanti di legno sono rimaste intatte e solo minimamente attaccate dal fuoco e che l'incendio non si è propagato negli altri ambienti dell'edificio.

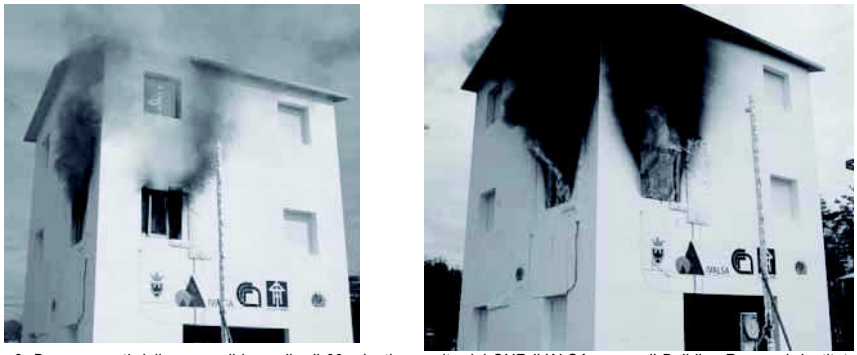


Figura 3: Due momenti della prova di incendio di 60 minuti eseguita dal CNR-IVALSA presso il Building Research Institute, Tsukuba, Giappone (2007) su un edificio di tre piani (fonte: www.progettosofie.it).

DURABILITÀ

Basterebbe da sola la foto sottostante per parlare di durabilità delle strutture di legno: Pagoda del tempio di Horyu-ji a Nara, Giappone, anno di costruzione 607 d.c., 5 piani, 31,5 m (vedi Figura 4). Splendido esempio di edificio interamente di legno, leggero, resistente e flessibile che ha resistito indenne a 14 secoli di terremoti distruttivi ed è arrivato in condizioni perfette ai nostri giorni. Il legno, se conosciuto e adeguatamente progettato può durare secoli (basti pensare agli splendidi esempi di coperture di chiese ed edifici monumentali presenti nel nostro paese): in Nord America l'80% degli edifici residenziali, anche multipiano, sono di legno e superano tranquillamente i 100 anni di vita.

Figura 4: A sinistra: pagoda del tempio di Horyu-ji a Nara, Giappone, anno di costruzione 607 d.c., 5 piani, 31,5 m di altezza. A destra: edificio di 3 piani a Vancouver, B.C., Canada. Alcuni di questi edifici, interamente a struttura di legno, arrivano a 4 piani e superano i 100 anni di vita.

Il concetto di durabilità di una struttura definita come "conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera" è, secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni, un requisito essenziale per la progettazione di una costruzione al pari della resistenza meccanica e della stabilità. Nelle strutture di legno, la conoscenza del materiale e la corretta progettazione e realizzazione di alcuni dettagli costruttivi fondamentali, accompagnata dalla redazione di un corretto programma di manutenzione, consente, senza costi aggiuntivi rispetto agli altri materiali, di raggiungere e superare abbondantemente i livelli di vita nominale della struttura previsti dalla normativa.

L'ambizione di queste Linee Guida è quella di costituire una sorta di manuale dal taglio piuttosto pratico e poco accademico che contenga le nozioni essenziali che servono al tecnico della pubblica amministrazione, al progettista, al costruttore e a tutti coloro che sono interessati a capire non solo quale è lo stato dell'arte attuale, gli elementi necessari alla progettazione, i riferimenti normativi esistenti, i sistemi costruttivi, i materiali e le soluzioni impiantistiche applicabili, ma anche e soprattutto quali sono i particolari costruttivi e gli elementi di tecnologia del legno utili per evitare errori ed utilizzare correttamente questo materiale straordinario ma per certi versi delicato. Senza avere la pretesa dell'esaustività, nel testo saranno presenti le informazioni essenziali e i necessari riferimenti bibliografici e normativi per approfondire le tematiche di maggiore interesse (in riferimento alle norme UNI, verrà riportato solo il nome e titolo della norma. Per indicazioni aggiornate sull'ultima versione disponibile si invita il lettore a consultare www.uni.com nella sezione Catalogo).
L'augurio che facciamo al lettore e a noi stessi è che questo rappresenti il primo passo verso un nuovo impulso al mercato edilizio che porti la nostra Regione e il nostro Paese ad essere all'avanguardia nei processi di sviluppo sostenibile del proprio territorio, recuperando e rinnovando quel patrimonio di conoscenze indispensabili su questo materiale che un tempo facevano parte del nostro bagaglio culturale.

Capitolo 1

Gestione della risorsa legno

1.1 LA GESTIONE FORESTALE SOSTENIBILE

Il legno è una materia prima rinnovabile. Questo concetto, fortunatamente, sta entrando sempre più nelle case dei cittadini, negli studi dei professionisti, nelle aule dei legislatori. E' però opportuno considerare le modalità con cui il legno può essere prodotto, e ciò proprio per non deludere le legittime aspettative di chi vede in questo materiale una risorsa inesauribile per il futuro, in grado di creare reddito per molti territori ma anche di soddisfare le esigenze tecniche richieste dai molteplici settori di impiego.
Bisogna quindi comprendere e affrontare i problemi legati alla gestione dei boschi in modo da assicurare una effettiva sostenibilità, sia tecnica che economica, condizione essenziale affinché si possa parlare del legno come di una risorsa veramente rinnovabile.
Nel corso degli ultimi anni nuove funzioni e diversi ruoli culturali e sociali attribuiti ai boschi hanno determinato una crescita dell'importanza, ma anche della complessità, dell'intero sistema. Il quadro legislativo, anche se talora implicitamente, ha dato maggiore importanza alle altre funzioni pubbliche del bosco oltre agli aspetti produttivi. Ciò ha aumentato le difficoltà in cui si trovano a operare i proprietari italiani di boschi, già in precarie condizioni gestionali a causa della diffusa mancanza di pianificazione, della carenza di infrastrutture e delle difficoltà di accesso a un mercato sempre più globale e competitivo. D'altro canto nessuna delle funzioni richieste al bosco può essere perseguita senza un coinvolgimento diretto dei proprietari, tale da permettere di coniugare i molteplici aspetti economici, sociali e ambientali che contraddistinguono una gestione sostenibile.
A tale riguardo è opportuno sottolineare il crescente interesse verso prodotti in grado di soddisfare consumi più responsabili, a ridotto impatto ambientale, di qualità e con forti legami con il territorio, con particolare riferimento alla domanda di legno come materiale da costruzione ottimale per le esigenze del costruire e dell'abitare sostenibile, alla domanda di energia da fonti rinnovabili e alla domanda di prodotti non legnosi.

Prima di accennare alle modalità di possibile gestione sostenibile merita ricordare che, a livello nazionale, la produzione di legname è in grado di alimentare solo parzialmente, per una quota intorno al 20% del fabbisogno, l'imponente sistema italiano legno-arredo, rappresentato da 77.000 imprese. In particolare, la materia prima è utilizzata all'interno del macro-settore del legno e dei prodotti a base di legno che comprende le trasformazioni destinate all'edilizia, residenziale e non residenziale: tale settore è rappresentato da 43.000 imprese di piccole e piccolissime dimensioni, diffuse in modo pressoché uniforme su tutto il territorio nazionale, che impiegano 179.000 addetti (Federlegno, 2008). Se a questi addetti sono aggiunti anche quelli del settore cartario (79.000) e quelli impegnati direttamente nel settore primario della selvicoltura e delle utilizzazioni forestali (41.000) si perviene ad un totale di 300.000 addetti nel settore forestale allargato, a cui fa complessivamente riferimento una quota pari a 0,9% del prodotto interno lordo del nostro Paese (MCPFE, 2007).
L'incremento annuale complessivo della massa legnosa, 35 milioni di m^3 nei boschi e 1 milione di m^3 nelle piantagioni da legno (INFC, 2007), è di molto superiore alla quantità di massa utilizzata corrispondente a circa 10 milioni di m^3 (MCPFE, 2007). Peraltro, ciò non va semplicisticamente interpretato deducendo che nel nostro Paese esista attualmente la possibilità di un aumento generalizzato dei prelievi legnosi; è auspicabile un incremento ma questo deve essere valutato localmente.
Riguardo agli assortimenti, la legna da ardere rimane la principale destinazione del materiale ritraibile dai nostri boschi rappresentando circa il 60% della produzione legnosa nazionale; le quantità di legname da opera prelevate, pur in presenza di sempre maggiori richieste provenienti dal settore edile e del mobile, sono rimaste invariate negli ultimi anni perché bilanciate dal progressivo abbandono delle attività agricolo-forestali in molte zone collinari e montane. Da rilevare inoltre che, finora, non si sono sentiti gli effetti dei numerosi impianti di arboricoltura da legno realizzati con i contributi del Regolamento 2080/92 e con il secondo periodo di programmazione comunitaria, incentivi destinati ad incrementare, a livello europeo, la produzione legnosa di qualità.
Le piantagioni da legno coprono attualmente una superficie pari a 122.250 ha (INFC, 2007): di questi, pur in forte calo negli ultimi venti anni, circa il 70% è rappresentato da impianti di pioppo; è da sottolineare che, da un punto di vista produttivo, la pioppicoltura rimane di fondamentale importanza dato che fornisce quasi il 40% di legname da opera prodotto in Italia. Rimanendo nelle produzioni legnose fuori foresta occorre ricordare anche gli impianti di short rotation forestry (SRF), prevalentemente per la produzione di energia, che ammontano a circa 10.000-12.000 ha (Zoboli et al., 2006). Intorno a questo settore si è focalizzata una forte attenzione da parte degli

agricoltori e dei proprietari terrieri, ma la produzione è ancora incerta e la redditività delle colture energetiche è sostanzialmente legata ai finanziamenti pubblici.
L'incremento delle superfici forestali nazionali è in linea con quanto sta avvenendo in Europa, dove i boschi stanno aumentando sia come superficie che come massa legnosa per ettaro, per l'effetto combinato di una corretta politica ambientale, di una consolidata gestione selvicolturale e della diffusione delle piantagioni. Da queste realtà, come pure dal Nordamerica e dalla Siberia, proviene la maggior parte del legname utilizzato in Italia per impieghi strutturali. Al contrario, sempre in un'ottica internazionale, grandi preoccupazioni provengono dai Paesi della fascia tropicale e sub-tropicale dove le foreste stanno diminuendo, soprattutto a causa degli incendi, dell'agricoltura intensiva e di altre forme di sfruttamento alle quali l'industria del legno contribuisce in maniera marginale. In Italia, ma anche negli altri Paesi importatori, i legnami provenienti dalle foreste tropicali sono essenzialmente utilizzati per realizzare prodotti da impiegare in edilizia, non per scopi strutturali, bensì come componenti di mobili, complementi d'arredo, finiture, spesso con funzione decorativa.
A fronte quindi della possibilità di utilizzare una maggiore quantità della materia prima legno, quali sono gli strumenti a disposizione per garantire la continuità della disponibilità futura di questa risorsa? Come è possibile procedere al fine di valutare la sostenibilità delle scelte operative che avranno effetti di lunga durata sul territorio in cui vengono operate?
In linea generale, la gestione sostenibile delle foreste deve conciliare la protezione dell'ambiente con uno sviluppo socio-economico del territorio, utilizzando la selvicoltura per conservare e migliorare il patrimonio forestale. Da un punto di vista del proprietario/imprenditore boschivo, la sostenibilità passa attraverso la possibilità di valorizzare i prodotti ottenuti e i servizi offerti al fine di ricavarne reddito da reinvestire, almeno parzialmente. Le strategie da mettere in atto sono in ragione delle capacità imprenditoriali e della presenza, o meno, di una serie organizzata di servizi di impresa.
La gestione forestale sostenibile è, peraltro, diventata ormai un cardine della legislazione forestale nazionale (D.lgs. 227/01, Decreto 16 giugno 2005: Linee Guida di Programmazione Forestale) e, a maggior ragione, di quella della Toscana(L.R: 39/2000).
Uno degli strumenti che si sta maggiormente diffondendo è rappresentato dalla certificazione forestale, in grado di aggiungere valore alle produzioni e di trasferire messaggi corretti al consumatore finale, considerata la grande importanza della comunicazione nei confronti di un pubblico sempre più attento alle problematiche ambientali. La certificazione forestale è al contempo uno dei meccanismi riconosciuti per una valutazione della sostenibilità, dato che permette di verificare, in modo sistematico e indipendente, se il sistema di gestione di una qualunque organizzazione sia conforme, o meno, a determinati requisiti ambientali, sociali ed economici.

Molte foreste produttive sono in corso di certificazione, e in alcuni Paesi (USA, Canada, Austria, Scandinavia) oltre il 30% della superficie forestale è già certificata, con previsione di raggiungere il 70-80% entro il 2010 dal momento che le maggiori associazioni di produttori di legname richiedono ai loro associati la certificazione come requisito obbligatorio.
La certificazione può affrontare due diverse problematiche:

- la gestione forestale;
- la rintracciabilità dei prodotti certificati o catena di custodia (chain of custody).

La prima interessa prevalentemente i proprietari e gestori forestali (anche riuniti in associazioni); la seconda riguarda soprattutto le industrie di trasformazione che devono documentare il corretto passaggio del legname certificato dalla foresta al consumatore.
A livello internazionale, gli schemi di certificazione più noti ed applicati sono i seguenti:

- **FSC (Forest Stewardship Council)**
  Si tratta di una ONG internazionale fondata nel 1993, che accredita gli organismi deputati a rilasciare la certificazione FSC (Enti di certificazione) e fissa standard nazionali o regionali conformi a 10 principi e 65 criteri di riferimento.I criteri FSC sono nati per le foreste tropicali, e sono in corso di adattamento alle realtà delle zone temperate. La superficie forestale certificata FSC è pari a circa 102milioni di ettari in 81 Paesi (settembre 2008 – www.fsc-info.org).

- **PEFC (Pan-European Forest Certification)**
  Si tratta di uno schema di certificazione nato dalle esigenze dei proprietari forestali Europei, senza peraltro compromettere l'indipendenza e la qualità dei criteri di valutazione, e diffusosi successivamente a livello mondiale. La superficie forestale certificata PEFC supera i 190 milioni di ettari in 20 Paesi (già dicembre 2008 - http://register.pefc.cz/statistics.asp).

- **CSA (Canadian Standards Association)**
  I criteri definiti dal governo Canadese e recepiti come norma tecnica nel 1996 sono considerati ottimi per le foreste dell'emisfero boreale. Essi constano di criteri accettati a livello internazionale e di una forte componente relativa al coinvolgimento sociale.

- **SFI (Sustainable Forestry Initiative)**
  L'American Forest and Paper Association ha sviluppato questo schema per i propri associati, rendendolo obbligatorio. Attualmente lo schema può essere applicato anche dai non-associati, tramite licenza. Lo schema è basato su indicatori prestazionali e risulta particolarmente adatto ad un contesto dove la proprietà privata è molto diffusa.

I precedenti due standard godono peraltro del mutuo riconoscimento PEFC.
La situazione italiana al dicembre 2008 vede una superficie nazionale certificata complessiva di circa 748.399 ha (www.fsc-info.org, http://register.pefc.cz/statistics.asp).
Sulla scia di quanto concretizzato dalla Magnifica Comunità di Fiemme, 11.000 ha certificati FSC dal 1997 e dal Consorzio forestale dell'Amiata, circa 3.000 ha certificati PEFC dal 2003, anche in Italia diverse altre realtà territoriali si sono approcciate, o sono sul punto di farlo, a questo nuovo modello di gestione forestale. Pur considerando che l'esempio della Magnifica Comunità di Fiemme non è facilmente ripetibile dato che in questo caso la certificazione forestale è solo il riconoscimento, per quanto importante, di una realtà forte di oltre 900 anni di tradizione e esperienza gestionale. A livello toscano, nuove iniziative di certificazione interessano molti complessi forestali regionali secondo lo schema FSC e/o PEFC. Da sottolineare il recente progetto della Comunità Montana Colline Metallifere (GR) che ha in corso la prima esperienza di certificazione congiunta FSC e PEFC.
Altro importante esempio di evoluzione in questa direzione è rappresentato in generale dal mondo della pioppicoltura Italiana, in corsa per veder riconosciute anche dagli schemi di certificazione quelle qualità tecniche e gestionali che le hanno valso, negli anni passati, il soprannome di "oro verde". Se ne stanno occupando in particolare alcuni Enti locali, forti del ritorno economico che la coltivazione del pioppo ha sui rispettivi territori, che vedono nello schema PEFC uno strumento indispensabile di sviluppo e affermazione di tutto il settore.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Federlegno-arredo (2008), *Rapporto ambientale,* Prima edizione, Milano.
[2] MCPFE(2007) *State of Europe's forests 2007,* MCPFE Liaison Unit, Warsaw.
[3] INFC (2005) *Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi forestali di carbonio. I caratteri quantitativi - MIPAAF Corpo Forestale dello Stato*, CRA-MPF, Trento.
[4] Zoboli R., Paleari S., Pontoglio S., Brun F., Masiero M., Pettenella D. (2006) *Politiche dell'energia rinnovabile da biomassa e filiere industriali del legno in Italia,* CERIS-CNR Federlegno-Arredo, Milano.
[5] Berti S., Brun F., Corona P., Pettenella D. (16-19 ottobre 2008), *Produzioni forestali: considerazioni generali in una prospettiva di sostenibilità e di organizzazione del mercato,* Atti del III Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina (in corso di stampa).
[6] www.fsc-info.org
[7] http://register.pefc.cz/statistics.asp

1.2 CERTIFICAZIONE DI BUONA GESTIONE FORESTALE

Il concetto di gestione sostenibile delle foreste, riaffermato ormai da tempo a tutti i livelli e non solo dagli addetti ai lavori, cerca di conciliare la protezione dell'ambiente con una gestione delle risorse naturali necessaria allo sviluppo economico di un territorio, considerando l'opportunità di impostare la selvicoltura verso forme innovative in grado di preservare, conservare e migliorare il patrimonio forestale
La possibilità di coniugare tutti questi aspetti è data, come già segnalato, dalla certificazione di buona gestione forestale che corrisponde, in pratica, ad una valutazione sistematica e indipendente eseguita da una terza parte accreditata (Ente di Accreditamento), rivolta a definire che il sistema di gestione di una qualunque organizzazione forestale sia conforme a determinati *principi*, *criteri* e *indicatori* ambientali, sociali ed economici.
La politica forestale italiana (anche se con difficoltà) e gli strumenti di pianificazione attualmente esistenti nel nostro Paese, stanno cominciando ad integrarsi con tali esigenze. Vengono ad essere infatti considerate non solo le funzioni produttiva e di protezione idrogeologica del bosco, come già si verificava nei vecchi piani di assestamento, ma anche quelle tipiche di un sistema dinamico in cui esistono interconnessioni tra le funzioni paesaggistiche, di tutela della biodiversità, turistico-ricreative, ambientali e sociali.
Per chiarezza, è necessario definire correttamente i termini alla base del processo di certificazione:

Principio	
Definizione	Norma di buona condotta di validità universale.
Illustrazione	Rappresenta un valore generale di riferimento, basato sul grado di conoscenza e comprensione globale che si ha di una determinata area o risorsa. Nel contesto della gestione forestale sostenibile, i principi forniscono il quadro di riferimento primario per gestire foreste in modo sostenibile.
Esempio	"il benessere sociale dei lavoratori dell'impresa forestale deve essere assicurato".

Criterio	
Definizione	Norma o condizione grazie alla quale viene espresso un giudizio.
Illustrazione	Precisa gli elementi costitutivi di un principio e permette di valutare i progressi realizzati per raggiungere l'obiettivo indicato dal principio stesso. Può esser visto come un principio di 2° ordine.
Esempio	"la salute dei lavoratori forestali e delle loro famiglie è assicurata".

Indicatore	
Definizione	Variabile o componente dell'ecosistema forestale o del sistema di gestione che venga utilizzato per definire lo stato di un criterio particolare.
Illustrazione	Rappresenta un attributo quantitativo, qualitativo o descrittivo, ed è costituito da un insieme di uno o più dati, connessi tra loro in un determinato modo.
Esempio	"la salute dei lavoratori forestali e delle loro famiglie è assicurata attraverso l'esistenza di un centro sanitario".

A titolo di esempio, riferendoci ai due principali standard internazionali e focalizzando esclusivamente sugli aspetti selvicolturali considerati nel processo di certificazione (Gallozzi 2008), lo schema PEFC richiede il mantenimento e la promozione delle funzioni produttive e protettive delle foreste e della loro gestione, mentre FSC prevede l'esistenza di un piano di gestione aggiornato e appropriato alla scala e all'intensità degli interventi.
In particolare:

- Il **criterio 3** PEFC cita: *Mantenimento e sviluppo delle funzioni produttive nella gestione forestale (prodotti legnosi e non legnosi)*.
  Sono richiesti i seguenti 4 requisiti che, a loro volta, contengono degli indicatori con relativi parametri di misura.
  1. le attività di gestione forestale devono assicurare il mantenimento e/o il miglioramento delle risorse boschive in un contesto di pianificazione forestale a livello locale;
  2. deve essere assicurata la qualità delle attività di gestione forestale, con lo scopo di mantenere e migliorare le risorse forestali e di incoraggiare la produzione diversificata di beni e servizi nel lungo periodo;
  3. il livello quantitativo di utilizzazione dei prodotti forestali, sia legnosi che non-legnosi, non deve eccedere la quota prelevabile con continuità nel lungo periodo e non deve danneggiare le capacità di rinnovazione e reintegro naturale dei prodotti stessi;
  4. le operazioni di coltivazione del bosco e di utilizzazione dei prodotti ritraibili devono essere attuate con modalità e tempi tali da non ridurre la capacità produttiva dei popolamenti forestali interessati e privilegiando tecniche a ridotto impatto ambientale, in relazione alle specifiche condizioni operative.

Gli indicatori individuati si riferiscono alla percentuale di superficie boschiva gestita secondo piani di gestione forestale o strumenti pianificatori equiparati ai sensi delle normative regionali, in vigore o in revisione;

all'ammontare dei prodotti e servizi forniti dalla foresta; al bilancio tra incremento e utilizzazioni di massa legnosa in un periodo definito; alle tecniche di utilizzazione forestale; densità e caratteristiche della viabilità forestale.

- Il **criterio 5** PEFC cita: *Mantenimento e appropriato miglioramento delle funzioni protettive della gestione forestale (con specifica attenzione alla difesa del suolo e alla regimazione delle acque)*.
  Non contiene requisiti, ma Indicatori che riguardano:
  1. La disponibilità di cartografia tematica forestale;
  2. L'entità della superficie forestale gestita a fini protettivi e sue variazioni nel tempo (Superficie forestale soggetta a vincoli per fini protettivi);
  3. Le operazioni selvicolturali in cedui e fustaie;
  4. Le lavorazioni del suolo in aree forestali;
  5. I criteri per l'esecuzione del concentramento ed esbosco del legname;
  6. L'uso di prodotti chimici (registrazione dell'uso di prodotti chimici);
  7. I trattamenti selvicolturali in boschi con funzione protettiva (indicazioni gestionali volte alla massimizzazione della funzione protettiva).

- Il **principio 7** FSC cita: *Deve essere predisposto, realizzato e aggiornato un piano di gestione forestale appropriato alla scala e all'intensità degli interventi. Nel piano devono essere chiaramente definiti gli obiettivi di lungo periodo della gestione e le modalità per raggiungerli.*
  Sono individuati 4 criteri:
  1. Il piano di gestione e i documenti ad esso collegati devono presentare: obiettivi della gestione; descrizione delle risorse forestali che devono essere gestite, le limitazioni ambientali, l'uso dei terreni e le forme di proprietà, le condizioni socio-economiche e i limiti dei terreni confinanti; descrizione del sistema selvicolturale; giustificazione della stima della ripresa annuale e dei criteri di selezione delle specie al taglio; modalità per il monitoraggio delle dinamiche e dello sviluppo della foresta; modalità per l'identificazione e la protezione di specie rare, minacciate e in pericolo; carte topografiche che descrivono le risorse forestali, comprese le aree protette, le attività di gestione programmate e le proprietà terriere; descrizione e giustificazione delle tecniche di utilizzazione e delle attrezzature da utilizzare;
  2. Il piano di gestione deve essere periodicamente rivisto per comprendere i risultati del monitoraggio o le nuove informazioni tecniche e scientifiche, e per rispondere alle mutate condizioni ambientali, sociali ed economiche;
  3. I lavoratori forestali devono ricevere un'adeguata formazione professionale e devono essere sottoposti ad una supervisione allo scopo di assicurare la corretta realizzazione del piano di gestione;
  4. Il responsabile della gestione forestale, pur rispettando le necessità di segretezza dell'informazione, deve rendere pubblica una sintesi dei principali elementi del piano di gestione, compresi quelli elencati al punto 1.

In entrambi i casi (FSC e PEFC), risulta evidente che il piano di gestione forestale è lo strumento fondamentale per il conseguimento della certificazione, documento che deve necessariamente fornire indicazioni in merito a:

- uso del territorio forestale e sua evoluzione, situazioni precedenti di pianificazione silvopastorale, forme di governo e di trattamento passate, eventuali variazioni apportate al piano dei tagli e loro giustificazione;
- descrizione della stazione: ubicazione, posizione geografica e topografica; morfologia del territorio; idrografia; precipitazioni annue, stagionali e mensili; litotipi, loro caratteri e distribuzione nel territorio; individuazione delle presumibili fitocenosi originarie, appartenenti ai cingoli di vegetazione o alle zone fitoclimatiche presenti, al fine di evidenziare le tipologie forestali attuali e potenziali; tipologia dei suoli e dell'humus;
- descrizione dei soprassuoli arborei e loro composizione;
- stato di salute dei soprassuoli (entità e tipo di danni) e la loro stabilità fisica;
- stato della rinnovazione;
- individuazione delle aree ad elevato interesse storico, ambientale e naturalistico (biotopi di particolare rilevanza naturalistica, zone umide, aree faunistiche particolari, boschi da seme, punti panoramici, ecc.), che necessitano di particolari forme di gestione o di salvaguardia (boschi didattici, boschi testimoni, aree a riposo selvicolturale);
- fenomeni di dissesto ed erosivi;
- dotazione di infrastrutture (viabilità e altro);
- individuazione delle funzioni prevalenti da attribuire alle singole particelle forestali, ad esempio: bosco a preminente funzione produttiva, protettiva, turistico-ricreativa;
- individuazione degli obiettivi della gestione;
- individuazione del modello colturale e della forma di governo;

- consistenza (volumi, biomasse) dei soprassuoli e il loro ritmo di accrescimento;
- piano dei tagli e giustificazione della stima della ripresa;
- individuazione delle modalità di utilizzazione più appropriate, conformi ai principi della sostenibilità della gestione;
- aree precedentemente soggette a taglio, comprese utilizzazioni straordinarie o non pianificate;carte topografiche, particellari e ogni altro tipo di carta che risulti utile per una maggiore chiarezza del piano ed una più efficace applicazione.

A fronte di questi chiari riferimenti, vere e proprie linee guida in grado di attuare "una buona pratica gestionale" dei soprassuoli forestali, esistono però problemi di applicabilità a gran parte dei territori nazionali causati dalla non ancora adeguata diffusione dei citati piani di gestione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Berti S., Brun F., Corona P., Pettenella D.(16-19 ottobre 2008), *Produzioni forestali: considerazioni generali in una prospettiva di sostenibilità e di organizzazione del mercato,* Atti del III Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina (in corso di stampa).

[2] Gallozzi M.R. (16-19 ottobre 2008), *La certificazione forestale come strumento per una gestione sostenibile,* Atti del III Congresso Nazionale di Selvicoltura, Taormina (in corso di stampa).

[3] ICILA, maggio 2008.

1.3 LA REALTÀ FORESTALE TOSCANA E LE NUOVE OPPORTUNITÀ DI APPROVVIGIONAMENTO

In Italia il comparto del legno sta registrando un generale incremento del consumo di materia prima, essenzialmente in conseguenza di due fenomeni: il maggior uso di biomasse legnose per la produzione di energia (principalmente energia termica) e il crescente impiego del legno in edilizia, specialmente con funzione strutturale.
Alcune statistiche risalenti al 2004 evidenziano che la biomassa (ovvero legno e rifiuti) in Italia rappresenta circa il 30% delle fonti di energie rinnovabili, con un costante incremento della richiesta di legna da ardere, cippato e pellet; questo incremento è motivato sia da strumenti legislativi di incentivo al risparmio energetico e all'uso di fonti rinnovabili, sia dalla effettiva convenienza economica derivante dall'uso di combustibili legnosi.
Allo stesso tempo la domanda di legname per impieghi in edilizia è andata via via crescendo. Tanto per citare un dato, secondo l'analisi EUWID 2006, in Italia il consumo annuo di legno lamellare incollato è passato dai 100.000 m^3 del 1996 ai quasi 900.000 m^3 del 2005 e nel corso del 2007 il nostro è diventato il primo Paese europeo per quanto attiene il consumo di questa tipologia di materiale strutturale.
Anche in Toscana la filiera del legno riveste un ruolo importante; secondo dati ISTAT (2001) le aziende legate ai prodotti in legno in Toscana sono circa 3.700 con più di 12.000 addetti (senza considerare quelle del comparto mobili che sono almeno 3.000). Il fabbisogno di legno è stimato in circa 3.000.000 m^3 di equivalente tondo, di cui meno di un terzo viene attualmente prodotto in regione.
Queste considerazioni evidenziano come il quadro generale per il settore legno sia positivo, soprattutto se rapportato ad un contesto generale di scarsa crescita economica che riguarda non solo l'Italia ma l'Europa e l'Occidente in generale.
A fronte della crescita del consumo di legno, si continua però a registrare uno scarso impiego del legname prodotto sul territorio nazionale: difficoltà nel reperimento delle specie più richieste dal mercato, discontinuità nell'approvvigionamento, costi di produzione relativamente alti, qualità del prodotto "non garantita", sono alcuni degli elementi che hanno contribuito nel tempo a orientare la domanda di legname verso quello d'importazione, sia per quanto riguarda il tondo che gli elementi segati. Come conseguenza i boschi italiani, e quelli toscani non fanno eccezione, come già ricordato, sono attualmente sottoutilizzati ed inoltre il valore del materiale prodotto è generalmente molto basso, a causa di destinazioni verso trasformazioni a basso valore aggiunto, come legna per energia o imballaggio.

IL BOSCO IN TOSCANA

Il bosco in Toscana costituisce una risorsa importantissima: la Toscana infatti possiede la più estesa copertura forestale tra le Regioni d'Italia (1.015.728 ettari, secondo l'inventario Forestale Nazionale), con un numero di alberi stimato pari a 1.425.843.000. La provvigione legnosa, ovvero la quantità di legname presente nei boschi, è valutata intorno ai 123,5 milioni di m^3, con un accrescimento annuo di quasi 5 milioni di m^3 (circa il 4%): il tasso di prelievo, vale a dire il quantitativo di legname utilizzato ogni anno, è circa il 40% dell'incremento annuo, con la conseguenza che la risorsa ogni anno cresce ulteriormente.
Questa consistente biomassa legnosa è costituita però prevalentemente da boschi cedui che, da un punto di vista produttivo, forniscono prevalentemente legna da ardere o biomassa per usi energetici. Solo una parte limitata della produzione dei boschi cedui trova impiego come paleria agricola, oppure per travature di sezione ridotta: nella maggior parte dei casi questo legname proviene dai boschi di castagno.
Per una produzione di legname "da opera" (quale ad esempio legname per usi strutturali, complementi d'arredo, pavimenti), la risorsa utilizzabile risiede nei boschi di alto fusto (fustaie di abete bianco, douglasia, pino, faggio), oppure è ricavabile da specie arboree cosiddette "sporadiche" per la natura della loro distribuzione nel territorio (aceri, ciliegi, frassini, noci, querce, sorbi): queste specie sono in grado di produrre un legname di elevato pregio, e sono al momento scarsamente utilizzate, anche perché non è diffusa tra i proprietari ed i gestori della risorsa forestale la coscienza del loro valore (non solo commerciale ma anche paesaggistico).
Un'altra importante fonte di approvvigionamento di legname in futuro potrà derivare dalle piantagioni per arboricoltura da legno realizzate a partire dalla metà degli anni '90 grazie all'impulso di finanziamenti dell'Unione Europea: in sostituzione di terreni prima destinati all'agricoltura, infatti sono stati "imboschiti" circa 9.000 ettari di superficie che, se ben gestiti, forniranno legname di elevato pregio tradizionalmente molto apprezzato e ricercato dall'industria italiana del mobile (noce, ciliegio, frassino, farnia, rovere).

I PRODOTTI LEGNOSI OTTENIBILI

Come accennato in precedenza i boschi della Toscana sono molto variegati sia per quanto riguarda le specie arboree che li compongono, sia per le forme di gestione praticate. Se consideriamo le possibili destinazioni produttive del legname ricavato dall'utilizzazione di questa risorsa, otteniamo una vasta gamma di prodotti finiti o

semilavorati che potrebbero (e in alcuni casi già lo sono) essere utilizzati nell'ambito della filiera del legno. Alcuni esempi:

Impieghi strutturali
Per la produzione di legname strutturale il materiale più idoneo può essere ricavato dalle fustaie di conifere, quali abete bianco, douglasia, pino marittimo ed eventualmente pino domestico (meno adatto dei precedenti perché generalmente con fusto non rettilineo e con lunghezze utili inferiori). Questi legnami possono essere utilizzati tal quali, quindi sottoforma di legno massiccio, oppure trasformati in elementi incollati (lamellari, KVH, bi-lam o tri-lam, pannelli di tavole incrociate). In particolare l'abete bianco e la douglasia non presentano alcun inconveniente nei processi di incollaggio e le rese di lavorazione sono soddisfacenti. Anche il legname di castagno può essere utilizzato con funzione strutturale, come ampiamente dimostrato dalla tradizione costruttiva toscana: attualmente, a causa della modalità di gestione dei boschi (legata anche a problemi fitosanitari di questa specie arborea), le dimensioni delle sezioni che possono essere ricavate da questa specie sono però medio piccole.

Semilavorati per supporto, rivestimenti
I tronchi di dimensioni maggiori, con diametri superiori ai 45 cm possono essere trasformati per sfogliatura e ricomposti in pannelli di compensato. Questo tipo di lavorazione, tradizionalmente effettuata con il legname di pioppo o specie con caratteristiche simili, può essere praticata anche sui tronchi di pino con buoni risultati. Una possibile limitazione è dovuta alla eventuale presenza di grossi nodi (ad esempio nel pino domestico), oppure a difetti di forma del fusto molto pronunciati (curvature, ovalità della sezione, rastremazione). Con materiale di qualità più scarsa possono essere invece realizzati pannelli di scaglie (OSB) oppure pannelli di fibre o particelle.

Pannelli di legno massiccio
I pannelli di legno massiccio sono ideali per la realizzazione di superfici quali tavoli, top per cucine, banconi ecc. Le sperimentazioni condotte su specie legnose toscane, hanno evidenziato la buona attitudine di faggio, castagno, pino a questo impiego; leggermente più problematico, in particolare per quanto riguarda la stabilità dimensionale, l'uso di cerro e robinia.

Pallet ed imballaggi
Per questa destinazione possono essere utilizzati i tronchi di qualità inferiore di abete bianco, douglasia, pini (se la resina non costituisce un impedimento per il contatto con le merci), faggio e pioppo. Questo impiego non è da considerarsi ad elevato valore aggiunto, ma si tenga presente che attualmente gran parte del legname utilizzato viene acquistato fuori dalla Toscana o addirittura all'estero.

Complementi d'arredo
Il legname destinato ai prodotti con maggior valore aggiunto deve possedere elevati requisiti: dimensionali (affinché si possano effettuare lavorazioni convenienti), qualitativi (limitata presenza di difetti) ed estetici. Per produrre legname di elevata qualità, da destinare alla segagione o alla trancia per realizzare fogli di rivestimento, può essere conveniente ricorrere ad impianti specializzati per arboricoltura da legno, nei quali attraverso la mano dell'uomo, con opportuni interventi colturali, il prodotto legno viene valorizzato al massimo. Un'alternativa può essere la valorizzazione delle specie sporadicamente presenti nei boschi della Toscana, generalmente come alberi isolati o piccoli gruppi. Anche alcuni residui di boschi di querce "nobili" (rovere e farnia) presenti in Regione potrebbero essere meglio valorizzati ad esempio per la produzione di pavimenti massicci o supportati.

COME VALORIZZARE IL LEGNAME TOSCANO

Le analisi della risorsa e le esperienze realizzate hanno evidenziato che il legno prodotto in Toscana può essere convenientemente utilizzato per molteplici impieghi. Fra le strategie che occorrerebbe mettere in atto per un più vasto impiego del legname autoctono si possono citare le seguenti:

- incentivare ulteriormente l'uso del legno in edilizia, anche attraverso strumenti normativi di carattere regionale;
- rafforzare le conoscenze dei progettisti e dei tecnici degli Enti Pubblici, come già intrapreso attraverso i corsi di formazione sull'edilizia in legno promossi da ARSIA;
- attivare sinergie di filiera, promuovendo la formazione di consorzi tra proprietari dei boschi e tra imprese di trasformazione, la creazione di marchi e la certificazione della materia prima e della filiera. Bisogna tenere presente che in ambito locale, ma anche nazionale, il settore delle prime lavorazioni del legno soffre di una consistente riduzione degli utili d'impresa, il che favorisce l'importazione di legname dall'estero già semilavorato e alla lunga la scomparsa di attività di prima trasformazione sul territorio, con l'impossibilità quindi di realizzare filiere "corte";
- realizzare progetti esemplari, nella consapevolezza che la possibilità di toccare con mano esempi concreti consente di promuovere l'edilizia in legno, aiuta gli operatori del settore a fare scelte alternative, aumenta le conoscenze tecniche relative all'uso del legno in particolare nelle costruzioni.

Inoltre è opportuno attuare iniziative volte a migliorare la conoscenza dell'offerta e della domanda di legname in Regione (come la creazione di una borsa del legno o come già fatto attraverso un monitoraggio dei prezzi del legname in Toscana). Occorre infatti tornare a pensare al bosco come un fattore produttivo, con una sua valenza economica che è in armonia e non in contrasto con le altre funzioni essenziali (paesaggistica, ricreativa, protezione idrogeologica, faunistica, ecc.), grazie ad un' oculata gestione che non intacca la risorsa ma consente di raccogliere i frutti prima che la materia prima diventi inutilizzabile. È necessario inoltre (ri)portare l'attenzione dei proprietari e dei gestori delle risorse (e anche degli utilizzatori del legname) sulle potenzialità delle specie legnose meno conosciute, attivando quegli strumenti di cura e gestione delle foresta che consentano la produzione di legname di buona qualità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] ARSIA (2005), Rapporto sullo stato delle Foreste in Toscana 2005, Regione Toscana.
[2] ARSIA (2006), Rapporto sullo stato delle Foreste in Toscana 2006, Regione Toscana.
[3] ARSIA (2007), La selvicoltura delle specie sporadiche in Toscana, Regione Toscana.
[4] E.T.S.A.F, I.N.E.A (1993), Il sistema foresta-legno in Toscana.
[5] www.compagniadelleforeste.it
[6] www.infoimprese.it
[7] www.strutturedilegno.it
[8] www.istat.it
[9] www.corpoforestale.it
[10] www.euwid.com
[11] www.ifnc.it

Capitolo 2

Elementi di tecnologia del legno

2.1 CARATTERISTICHE FONDAMENTALI DEL MATERIALE LEGNO

IL LEGNO COME INSIEME DI CELLULE E TESSUTI VEGETALI

Sono numerose e differenti le definizioni del materiale legno; si farà qui riferimento a due di esse.
Universalmente riconosciuta è una definizione cosiddetta "topografica" secondo la quale il legno è la materia prima, fornita dalle porzioni di tronco delle piante arboree poste al di sotto della corteccia.
Il legno propriamente detto ha, infatti, nella pianta vivente una doppia funzione:

- trasportare i liquidi, la cosiddetta "linfa grezza", dalle radici alle foglie, assicurando quindi il flusso linfatico. La linfa grezza è composta di acqua e sali minerali, necessari alle foglie per portare a compimento il processo della fotosintesi clorofilliana. Il trasporto ascendente della linfa si realizza all'interno dell'"alburno", la porzione più esterna del tessuto legnoso. La linfa elaborata, che contiene, sempre disciolti in acqua, i prodotti della fotosintesi, è invece trasportata dall'alto verso il basso da un sottile tessuto sottocorticale chiamato "floema";
- fornire resistenza meccanica al fusto ed ai rami, al fine di consentire all'organismo vegetale di resistere meccanicamente alle sollecitazioni imposte, oltre che dal peso stesso della pianta e delle foglie, da vento, neve e pioggia. Le cellule legnose sono in grado di sostenere carichi elevati quando sono sollecitate in direzione parallela al loro massimo asse di sviluppo, che, in linea generale, corrisponde a quello di sviluppo del fusto o del ramo. Collegandosi al punto precedente, mentre l'alburno ha la doppia funzione di trasporto dei liquidi e di sostegno della pianta, la funzione della porzione più interna del fusto, il "durame", è di solo sostegno meccanico.

Figura 2.1: secondo la definizione topografica del legno, ciò che è posto al di sotto della corteccia del tronchetto di robinia (Robinia pseudoacacia) in figura è legno. La porzione di colore più chiaro è il cosiddetto alburno, mentre la porzione più scura all'interno è il durame.

Una seconda definizione è quella istochimica, per cui il legno è il tessuto di origine biologica costituito da elementi cellulari lignificati.
Gli elementi cellulari vengono prodotti da un tessuto vivente chiamato cambio, posto nella corteccia interna. Il cambio produce nuove cellule legnose verso l'interno e nuove cellule del floema (che si trasformano successivamente in cellule della corteccia) verso l'esterno. Secondo la seconda definizione (quella istochimica) le cellule legnose appena formate non possono essere ancora definite propriamente "legno" perché la parete

cellulare appena formatasi non è ancora rigida, in quanto non lignificata. Ma nel corso dei successivi 10 – 14 giorni la cellula va incontro al processo di maturazione, attraverso la cristallizzazione di parte della cellulosa già presente e la deposizione della lignina: la parete cellulare diventa così rigida e la cellula nel suo insieme biologicamente morta, perdendo il suo nucleo e gli altri contenuti cellulari.
Di conseguenza il legno propriamente detto è composto quasi esclusivamente da cellule morte, cave, a parete cellulare rigida.

Figura 2.2: immagine ottenuta al microscopio ottico che mostra una sezione trasversale di legno di pioppo. Si nota in basso il legno vero e proprio con cellule a parete lignificata (la lignina risulta evidenziata dalle linee più scure), mentre in alto sono visibili le cellule del floema. Il sottilissimo strato di 2 – 3 cellule che si frappone tra i due tessuti è il cambio (foto Capretti, CNR – IVALSA).

I costituenti delle pareti cellulari sono sempre gli stessi e variano entro limiti non molto distanti:

lignina	dal 22% al 30%
emicellulose	dal 13% al 27%
cellulosa	dal 42% al 50%

Oltre a questi composti si hanno poi sostanze depositate sulle pareti cellulari o addirittura insinuatesi nelle pareti stesse, le quali differiscono in entità e composizione da specie a specie e a seconda dell'età dell'albero; esse sono i cosiddetti "estrattivi", che possono essere responsabili di numerose caratteristiche dei legni che li contengono. I composti chimici che più frequentemente fanno parte degli estrattivi sono terpeni, fenoli, tannini, carboidrati, composti azotati; compaiono infine sostanze minerali in quantità non maggiore dell'1%.
Le cellule costituenti i fusti legnosi non sono tutte uguali, ma - prescindendo dalle variazioni individuali - si differenziano nella forma e nella distribuzione spaziale per poter rispondere alle diverse funzioni loro assegnate.
L'insieme delle cellule atte ad un certo ufficio viene detto "tessuto" ed i tessuti fondamentali presenti in ogni fusto lignificato sono quelli di sostegno, di conduzione e di riserva.
Il tessuto di sostegno è formato da cellule allungate e a lume esiguo, comunemente dette "fibre", generalmente orientate in direzione parallela all'asse del fusto; il loro compito è quello di assicurare la resistenza meccanica dell'albero a tutte le sollecitazioni. Tale funzione è esclusiva per il legno dei fusti di Latifoglia, mentre per il legno di Conifera alla funzione puramente meccanica si aggiunge quella di conduzione; per tale motivo è diversa la denominazione delle cellule del tessuto di sostegno: "fibre" nelle Latifoglie, "tracheidi" nelle Conifere.

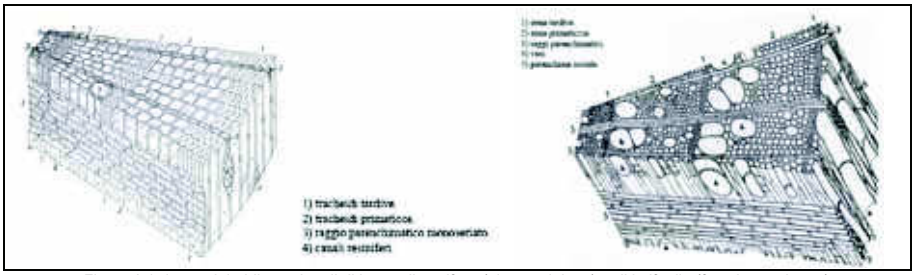


Figura 2.3: immagini tridimensionali di legno di conifera (pino, a sinistra) e di latifoglia (frassino, a destra).

Il tessuto conduttore delle Latifoglie è costituito da cellule allungate, a lume ampio, orientate parallelamente all'asse del fusto e disposte una sull'altra in modo da formare sistemi di conduzione continui detti "vasi" o "trachee" nei quali le pareti di fondo delle singole cellule sono state parzialmente o totalmente riassorbite. La grandezza dei vasi e la loro distribuzione sono elementi fondamentali per poter stabilire l'appartenenza di un legno ad una data specie.

I tessuti di riserva sono formati da cellule contenenti al loro interno granuli d'amido ed altre sostanze utili per la formazione di nuove cellule legnose; essi possono essere costituiti da aggregati di cellule orientate assialmente ("parenchima verticale") oppure in serie disposte in nastri orientati radialmente dalla periferia verso il midollo ("parenchima dei raggi"). La presenza più o meno abbondante di parenchima verticale e la grandezza e frequenza dei raggi sono anch'essi elementi assai utili per il riconoscimento dei vari legni.
All'eterogeneità del legno derivante dall'essere le cellule diverse fra loro per forma e orientamento si aggiunge un'altra caratteristica notevole generata dalla formazione per successivi accrescimenti anulari, influenzati dalle condizioni climatiche ed ambientali di crescita dell'albero; anche l'età dei tessuti inoltre ha grande importanza, perché influenza le dimensioni delle singole cellule, la compattezza e la resistenza meccanica dei tessuti, la presenza o meno di sostanze - non facenti parte della parete cellulare - che si originano durante il manifestarsi del fenomeno di "duramificazione".

IL LEGNO NEL FUSTO

La forma dei fusti arborei è quella di un solido di rotazione che non è un cono, ma nella maggior parte dei casi un paraboloide, che nelle Conifere arriva fino al vertice estremo (cimale), mentre nelle Latifoglie si ha normalmente ad un certo punto del fusto la suddivisione in due o più grossi rami.
Per descrivere e definire un qualsiasi legno occorre esaminare la superficie di quelle che vengono chiamate le "sezioni anatomiche", e cioè:

- le sezioni trasversali fatte perpendicolarmente all'asse midollare, in cui si vedranno chiaramente gli anelli di incremento annuale;
- la sezione longitudinale radiale fatta con un piano passante per l'asse midollare, in cui le tracce di incremento annuale compariranno secondo linee parallele;
- le sezioni longitudinali tangenziali fatte secondo piani paralleli all'asse midollare e tangenti alle circonferenze costituite dagli anelli di accrescimento: a causa della rastremazione del fusto le tracce degli incrementi compariranno come rami di iperbole.

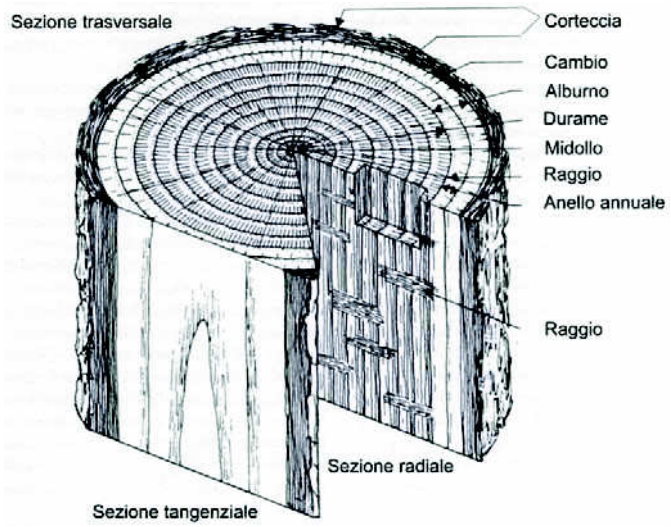


Figura 2.4: le sezioni principali del legno e la relativa disposizione dei tessuti (da Schweingruber, modificato).

Prendendo in considerazione la sezione trasversale di un fusto arboreo delle zone temperate vedremo dunque la successione di una serie di anelli di accrescimento, ognuna delle quali corrisponde di regola a un periodo annuale di vegetazione (dalla primavera all'autunno). Tale regola non è però assoluta dato che, in caso di forti siccità estive o di defogliazioni (da grandine, da attacchi parassitari o altro), si possono anche avere due o più anelli nell'anno; generalmente però essi non sono estesi a tutto il perimetro, quindi, avendo a disposizione l'intera sezione trasversale, è possibile identificarli. Nel caso di condizioni ambientali estremamente sfavorevoli durante una stagione vegetativa, la formazione dell'anello corrispondente può anche mancare del tutto. Infine si deve considerare che nei climi tropicali, dove la vegetazione non subisce mai un netto arresto, la formazione dei nuovi tessuti nei fusti avviene con continuità perciò non si può facilmente fare una stima, anche approssimativa, dell'età.
La visibilità degli anelli nelle zone temperate è resa possibile dal fatto che tra la zona formatasi in primavera (zona primaticcia) e quella estivo-autunnale (zona tardiva) vi è una differenza che, pur essendo più o meno netta

da specie a specie, è però sempre chiaramente visibile: nel legno di Conifera infatti al risveglio della vegetazione si formano tracheidi a lume ampio e parete sottile mentre verso il termine del periodo vegetativo si hanno tracheidi schiacciate, con lume ridottissimo e pareti spesse; ne consegue che mentre la prima zona, ad una osservazione macroscopica, appare biancastra la seconda assume colorazione bruna molto evidente. Nelle Latifoglie la necessità di una facile e rapida circolazione dei succhi alla ripresa vegetativa porta alla formazione di vasi a lume particolarmente ampio oppure a un loro maggior numero per unità di sezione trasversale; a mano a mano che la stagione procede, diametro e numero dei vasi diminuiscono ed in definitiva la percezione dei singoli anelli è per queste specie affidata più ad una differenza di compattezza che non a tonalità diverse di colore.
L'ampiezza degli anelli di incremento, cioè il loro spessore in direzione radiale, è un elemento macroscopico fondamentale per poter giudicare la rapidità di accrescimento del fusto in esame; esso è in stretta correlazione con le condizioni stazionali del sito in cui l'albero si trova e particolarmente con il clima, con la profondità, l'umidità e la pendenza del suolo, con l'altitudine e l'esposizione. In genere il fattore climatico che più condiziona l'ampiezza degli anelli è quello che limita maggiormente le possibilità di vegetazione: così in climi caldi e aridi sarà la scarsità di precipitazioni, mentre in climi freddi saranno le basse temperature e una breve durata del periodo vegetativo.
Le cellule formate per ultime dall'attività della zona cambiale verso l'interno del fusto con il passare del tempo, e con la formazione di nuove cellule più esterne, non prendono più parte alle funzioni di conduzione della linfa grezza dalle radici verso la chioma, ove l'attività clorofilliana elabora le sostanze richieste dall'accrescimento dell'albero. Ad un certo momento dunque dette cellule cessano da ogni attività o intervento diretto nella vita dell'albero ed in esse si compiono delle trasformazioni consistenti nella deposizione nel lume cellulare (ed in parte anche all'interno delle pareti cellulari) di particolari sostanze che modificano alcune fondamentali caratteristiche del legno.

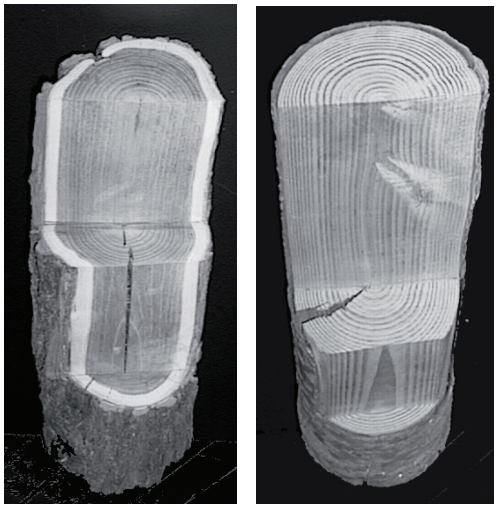


*Figura 2.5: tronchetto di robinia (*Robinia pseudoacacia*, a sinistra) e di duglasia (*Pseudotsuga menzsiesii*, a destra). Ambedue le specie posseggono un durame differenziato che risulta ben visibile nella robinia, mentre nel campione di duglasia il durame non si è ancora formato.*

Il fenomeno collegato con l'invecchiamento dei tessuti nell'albero vivente è detto "duramificazione": da esso deriva che negli alberi di una certa età la parte interna del fusto, detta "durame", si comporta diversamente dalla parte esterna periferica detta "alburno". Nel durame si ha una maggior densità da cui conseguono anche resistenze meccaniche superiori, inoltre la possibilità di attacco e l'alterabilità da parte di funghi e insetti sono minori grazie alle proprietà antisettiche delle sostanze duramificanti.
In alcune specie (abete rosso per esempio) le due zone, pur diverse nelle loro funzioni e caratteristiche, hanno lo stesso colore: tali specie vengono perciò dette "a durame indifferenziato"; in altre (larice, querce) durame e alburno differiscono per il colore con cui si presentano nelle sezioni, particolarmente in quelle trasversali: sono le specie "a durame differenziato".

DETERMINAZIONE DELLE SPECIE LEGNOSE

Il riconoscimento di un legno può apparire un compito semplice; riflettendo però su come spesso proprio quei caratteri macroscopici su cui si potrebbe basare l'identificazione siano soggetti a modificazioni per fattori ambientali intervenuti durante la vita dell'albero, per esposizione del legno ad agenti atmosferici o ad attacco di

agenti patogeni che alterano colore e consistenza, e infine per la variabilità naturale che esiste anche all'interno della stessa specie legnosa, ci si può rendere conto di come tale problema non vada affrontato con leggerezza. E' quindi opportuno che l'identificazione visiva, effettuata da un esperto, sia accompagnata in caso di dubbio da più approfondite analisi in laboratorio. Soltanto alcune specie presentano infatti una serie di caratteri macroscopici ben evidenti e peculiari per cui la loro identificazione non richiede né esami accurati né l'uso del microscopio; ad esempio le querce caducifoglie, grazie alla presenza dell'anello poroso e dei grandi raggi parenchimatici ben visibili ad occhio nudo, possono essere riconosciute con sicurezza, mentre l'abete bianco e l'abete rosso presentano entrambi un legno a durame ed alburno indifferenziato, color bianco crema, non facilmente attribuibile ad una delle due specie.

Il sistema più rigoroso per giungere all'identificazione di una specie legnosa è però rappresentato dall'osservazione microscopica della struttura anatomica del legno, durante la quale, esaminando un campione di materiale, l'anatomista sfrutta le peculiarità con cui i diversi tipi di cellule si presentano all'interno del tessuto legnoso.

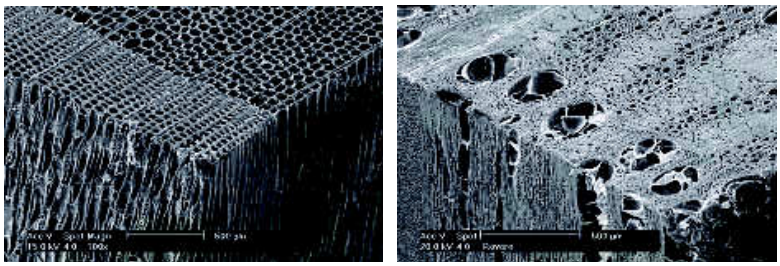


*Figura 2.6: immagini al microscopio elettronico a scansione (SEM) di legno di abete rosso (*Picea abies*, a sinistra) e di rovere (*Quercus petraea*, a destra). La disposizione degli elementi cellulari consente in molti casi di giungere alla identificazione delle specie legnose (foto Lazzeri, IVALSA – CNR).*

Nonostante lo stato di avanzamento delle ricerche abbia consentito di approfondire le conoscenze sulla struttura microscopica delle diverse specie, rimangono tuttavia in alcuni casi serie difficoltà: ad esempio è molto difficile giungere ad una sicura determinazione di campioni appartenenti a larice ed abete rosso.
E' necessario dunque essere ben coscienti dell'entità del problema, anche fino al punto di non esitare a decretare la non identificabilità del campione qualora persistano dubbi dopo ripetuti esami, in modo da operare all'interno dei margini di sicurezza.
In numerosi casi le caratteristiche anatomiche di specie legnose tra loro geneticamente molto vicine non consentono di determinare con chiarezza la specie. Ad esempio le specie di pioppo di più comune utilizzo in Italia non differiscono tra loro dal punto di vista anatomico; in tal caso la determinazione della specie si ferma al genere *Populus* sp. come specie plurima o gruppo di specie. Un nuovo esempio commercialmente molto importante è quello riguardante le cosiddette "querce caducifoglie", si tratta di un gruppo costituito da farnia (*Quercus robur* L.), rovere (*Quercus petraea* L.) e roverella (*Quercus pubescens* Willd) che producono legni tra loro non distinguibili con certezza, al punto tale da essere normalmente commercializzati con il nome di "Rovere". Sotto l'aspetto tecnologico, l'informazione che si ottiene è ugualmente sufficiente perché le principali prestazioni tecnologiche delle specie raggruppate all'interno del gruppo sono assimilabili.
Quello dei nomi utilizzati per indicare i legnami ottenuti dalle diverse specie legnose o dai gruppi di specie è un problema sempre aperto e sempre attuale, in particolare nell'ambito del commercio. Se infatti per i legnami più utilizzati esistono denominazioni comuni oramai consolidate (si vedano gli esempi fatti nel capoverso precedente), per altri legnami meno conosciuti o di nuova introduzione i nomi commerciali si basano spesso su somiglianze con altri legnami più noti o sulle mode estetiche del momento. Si vedano in tal senso i nomi commerciali di molti legnami tropicali chiamati "Noce di …" o "Noce del ... " per una reale o presunta somiglianza con il noce nostrano, senza che questa sia però confortata da una continuità di tipo tassonomico. Per fare chiarezza in questo ambito è stata recentemente pubblicata la norma UNI EN 13556 "Legno tondo e segati. Nomenclatura dei legnami utilizzati in Europa" che riporta per ciascuna specie legnosa (o gruppo di specie) di importanza commerciale il nome scientifico (genere e specie in lingua latina) e i nomi commerciali codificati in italiano, inglese, francese e tedesco.

CARATTERISTICHE TECNOLOGICHE DEL LEGNO

La tecnologia del legno si occupa del materiale dal momento in cui l'albero è stato abbattuto e accompagna le sue trasformazioni e lavorazioni fino al momento dell'impiego finale.

Sin dall'antichità il legno è stato usato dall'uomo per far fronte a molte e diverse esigenze; dalle primarie - un tetto, attrezzi di uso quotidiano, il fuoco per scaldarsi e cuocere i cibi - all'espressione di sensibilità individuali e dell'arte di un'epoca - sculture, intarsi, decorazioni di mobili o elementi architettonici .
La multiforme e continua presenza del legno intorno a noi è possibile proprio grazie alle sue caratteristiche tecnologiche, o meglio alle caratteristiche delle diverse specie legnose.
E' dunque molto importante imparare a conoscere le caratteristiche intrinseche delle specie legnose, che ne determinano le possibilità di impiego; solo a questo modo il materiale verrà usato correttamente e darà i risultati migliori.

Caratteristiche macroscopiche

Sono legate all'aspetto del materiale e sono rilevabili a vista dopo un attento esame.

Colore

Il colore dei legni allo stato fresco dipende da due fattori, uno dei quali è pressoché costante mentre l'altro è variabile. Il primo è il colore proprio delle pareti cellulari, che sono di tonalità bianco-giallognola; il secondo fattore è costituito dal colore delle sostanze non facenti parte della struttura cellulare, ma presenti nei succhi, nelle secrezioni all'interno del lume cellulare in dipendenza dell'attività fisiologica della pianta. Se queste sostanze - i cosiddetti "estrattivi" del legno - sono almeno in gran parte incolori, la tinta d'insieme del legno sarà ancora bianco-giallognola; in caso contrario sarà quella delle sostanze in questione, o da esse influenzata.
Con il fenomeno della duramificazione il contenuto in estrattivi può, nella parte interna del tronco, essere modificato in quantità e composizione ed è questo il motivo per cui un certo numero di legni si presenta, come abbiamo visto, con durame di colore diverso dall'alburno; tale differenza è uno degli elementi su cui si basa il riconoscimento delle specie legnose.
La colorazione del legno è inoltre una caratteristica variabile nel tempo, nel senso cioè che l'esposizione del legno all'aria e alla luce comporta modificazioni per effetto della perdita di umidità, e mutamenti di colore delle pareti cellulari e delle sostanze in esse contenute in conseguenza di azioni fisico - chimiche più o meno complesse.
Il problema delle alterazioni di colore nel tempo, cui si è posto solo in parte rimedio con l'applicazione superficiale di sostanze protettive che "bloccano" i raggi ultravioletti, riguarda naturalmente in maggior misura le industrie del mobile e dell'arredamento.
Alterazioni di colore possono essere causate anche da attacchi fungini, si veda in proposito il paragrafo 2.5.

Tessitura e fibratura

Sono termini che servono a definire caratteristiche visibili soprattutto nelle sezioni longitudinali di un pezzo di legno.
La tessitura indica le dimensioni degli elementi cellulari che formano i tessuti legnosi. Si riconducono i legni a tre tipi: a "tessitura fine" quelli di aspetto omogeneo e compatto, in cui non si riesce a distinguere alcuna cellula a occhio nudo (bosso, faggio, pino cembro...); a "tessitura grossolana" quelli nei quali si vedono agevolmente striature longitudinali più o meno sottili, derivanti dai vasi nei legni di Latifoglie e dai canali resiniferi nei legni di Conifere resinose (quercia, olmo, castagno, pino domestico...); a "tessitura media" quelli in cui i tessuti non hanno aspetto del tutto compatto, anche se non sono singolarmente visibili i vari elementi (pioppo, abete...).
La fibratura si riferisce alla direzione con cui sono disposti gli elementi cellulari, in relazione all'asse del fusto o del segato: si parla di "fibratura diritta" quando siano ad esso paralleli; di "fibratura inclinata o deviata o elicoidale" nel caso in cui siano inclinati; di "fibratura intrecciata" quando le inclinazioni siano discordanti fra loro in successivi accrescimenti; di "fibratura ondulata" quando siano riscontrabili ondulazioni parallele e regolari; di "fibratura irregolare" nel caso in cui siano variamente disposti.

Figura 2.7: aspetto macroscopico di campioni di larice (a sinistra) di quercia caducifoglia (al centro) e di noce (a destra). L'immagine in bianco e nero non consente di valutare il colore; nonostante ciò le differenze per quanto riguarda venatura e disegno restano evidenti.

Per poter riconoscere il tipo di fibratura di un pezzo di legno segato o piallato può essere necessario strapparne una scheggia, in quanto solo così le cellule risultano separate le une dalle altre e se ne può seguire l'andamento; infatti la sega e la pialla tagliano le cellule e, rendendo la superficie piana e liscia, non danno la possibilità di valutare la fibratura, che è invece evidente quando il legno sia stato lavorato "a spacco", con l'accetta; caso questo che si può riscontrare frequentemente quando si considerino manufatti, come travature e incavallature, piuttosto antichi, oppure quando si abbia a che fare con tecnologie "povere" (tipica lavorazione a spacco è quella per la produzione delle scandole).
Le particolarità della fibratura non sono solo dipendenti dalla specie legnosa, ma spesso da caratteri ereditari o da influenze avute dalla pianta nel corso della sua crescita.

Altre caratteristiche

Altre caratteristiche macroscopiche, che hanno però minore importanza, se non per casi molto particolari, sono:

- **la venatura** - dovuta all'alternanza di tonalità del colore delle zone primaticcia e tardiva dell'anello di accrescimento, che può essere da molto evidente a per nulla evidente;
- **il disegno** - l'aspetto assunto dalla venatura nelle sezioni longitudinali, che è diverso a seconda che la sezione sia radiale o tangenziale;
- **l'odore** - rilevabile su legno fresco di abbattimento, dovuto alla presenza di sostanze volatili all'interno del lume cellulare. In alcuni casi un odore caratteristico permane e risulta particolarmente evidente durante le lavorazioni, anche dopo diversi decenni (come nel legno di cipresso).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Giordano G. (1998), *Tecnologia del legno,* UTET, Torino.
[2] Schweingruber F.H. (1978), *Mikroskopische Holzanatomie*, Zürcher, Zug.
[3] UNI EN 13556 - "Legno tondo e segati – Nomenclatura dei legnami utilizzati in Europa".

2.2 UMIDITÀ, STAGIONATURA E PROBLEMI LEGATI AI MOVIMENTI DEL LEGNO

RELAZIONI LEGNO-ACQUA

Vi è una forte affinità tra legno e acqua, dovuta al fatto che nella composizione delle pareti cellulari vi sono lignina, cellulosa ed emicellulose (polisaccaridi), nelle cui molecole entra un forte numero di gruppi idrossilici, ai quali l'acqua si collega rapidamente. Inoltre la superficie interna di contatto fra materia legnosa e acqua è enorme, per via della complessa struttura della parete cellulare; alcuni Autori parlano di oltre duecento metri quadrati per grammo. A causa di tali caratteristiche il legno è definibile come materiale igroscopico.

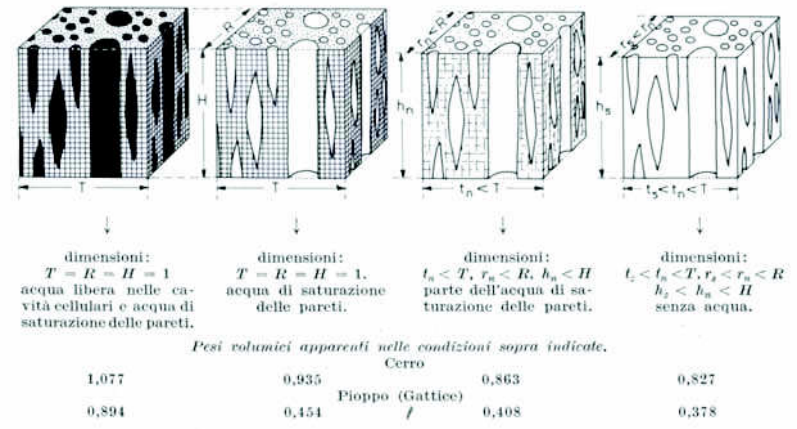


Figura 2.8: descrizione del processo di perdita di umidità da parte del legno (da Giordano).

Il contenuto di acqua nel legno è soggetto a variazioni continue: il massimo si ha quando l'albero è ancora in piedi e attraverso le cellule passano i succhi che salgono dalle radici verso la chioma, riempiendo completamente il lume cellulare e permeando le pareti.
Dopo il taglio dell'albero molto lentamente l'acqua libera all'interno delle cellule evapora e dopo un certo periodo di tempo al suo posto troviamo solo più aria e vapore; a questo punto, se l'aria dell'ambiente circostante ha uno stato igrometrico che le consente di assumere altra umidità, anche parte dell'acqua che permea le pareti cellulari potrà evaporare, fino a un momento in cui vi sarà equilibrio tra il contenuto d'acqua delle pareti cellulari e quello dell'aria: si sarà così attuato il processo di essiccazione naturale o stagionatura.
Per i motivi esposti all'inizio del paragrafo è impossibile che in condizioni ambientali normali tutta quest'ultima parte di acqua possa andarsene; se si vuole ottenere questo risultato bisogna ricorrere a particolari trattamenti (impiego di stufa ventilata per eliminazione di tutta l'acqua contenuta nel legno).
L'acqua collegata alle pareti cellulari viene detta "acqua di saturazione", quella libera all'interno delle cellule "acqua di imbibizione" o "acqua libera"; vi è poi l'"acqua di costituzione", che è uno dei componenti la parete cellulare e la cui liberazione è legata alla distruzione della parete stessa.
E' molto importante stabilire quale sia il contenuto d'acqua di un pezzo di legno, in quanto come vedremo l'umidità influisce soprattutto sulle sue dimensioni e inoltre su particolari caratteristiche, come la resistenza meccanica e la possibilità di degrado ad opera di funghi e insetti. Le norme nazionali ed internazionali prescrivono l'espressione dell'umidità in valore percentuale riferito al peso del legno completamente secco:

$$U\% = (P_u - P_0) / P_0 * 100$$

in cui P_u è il peso del campione di cui si vuole determinare l'umidità, P_0 il peso dello stesso campione assolutamente secco, e $P_u - P_0$ è l'umidità assoluta.
In Italia è generalmente considerata normale un'umidità percentuale u%=12%, corrispondente in teoria a legno in equilibrio igrometrico con aria a temperatura di 20oC e umidità relativa del 65%.
Nel momento in cui si ha lo stato di saturazione totale delle pareti cellulari l'umidità si aggira fra il 28% e il 40% del peso secco; orientativamente si considera il 32%. Quindi nel caso di umidità percentuale normale (12%) c'è solo una parte dell'acqua di saturazione delle pareti, e non c'è affatto acqua libera.
L'immediata conseguenza della perdita di umidità del legno durante l'adeguamento alle condizioni igrometriche ambientali è il ritiro, mentre il fenomeno contrario (acquisizione di umidità) dà luogo al rigonfiamento; la variazione del contenuto d'acqua implica dunque variazioni dimensionali nel legno.

Ma ciò avviene soltanto in un campo preciso che va dallo stato di essiccazione totale (umidità zero) al punto di totale saturazione delle pareti cellulari; infatti solo dal momento in cui vengono coinvolti i legami fra l'acqua e i componenti delle pareti cellulari si hanno modificazioni fisiche a livello delle cellule, che sommandosi portano a modificazioni dimensionali non trascurabili.
E' importante notare che qualsiasi pezzo di legno è soggetto a ritiro e rigonfiamento, anche se in opera da molto tempo: il legno non è mai inerte sotto l'influenza dell'umidità.
Caratteristica di questo materiale è poi una marcata anisotropia nei ritiri, cioè un comportamento non omogeneo secondo le tre direzioni anatomiche assiale, radiale e tangenziale. Non si tratta di differenze qualitative ma quantitative: passando dallo stato fresco allo stato secco si ha in direzione assiale una diminuzione dimensionale quasi sempre inferiore all'1%; in direzione radiale una variazione che va dal 3% al 7,5%; la maggiore è in direzione tangenziale, dal 5,5% al 15%. La conseguenza della diversità dei ritiri nelle tre direzioni anatomiche è che un solido di legno essiccandosi non mantiene un rapporto di similitudine nello spazio.
Se vogliamo avere un'idea del perché ciò avvenga, dobbiamo considerare che il legno deriva da un materiale vivente, che deve rispondere a una determinata funzione nella pianta in piedi, assicurando la resistenza meccanica e lo svolgimento delle attività di nutrizione e sviluppo; per assolvere a questi scopi i tessuti legnosi non possono essere costituiti omogeneamente, ma devono avere differenze al loro interno tra un punto e l'altro, sia nella disposizione strutturale che nella grandezza delle cellule.
Le condizioni ambientali variabili nel corso della vita dell'albero portano poi a differenze nello spessore degli anelli di accrescimento, e quindi nel massa volumica del legno, che è determinante sull'entità del ritiro.
All'atto del taglio della pianta entrano in gioco le differenze di umidità fra i vari punti, in particolare secondo la distanza dal centro, e lo scaricarsi di tensioni interne esistenti nel fusto in piedi; inoltre gli elementi sottoposti a stagionatura hanno sempre un certo spessore e la perdita di umidità può avvenire, soprattutto in direzione longitudinale, soltanto attraverso la superficie. Qui si attuerà un rapido equilibrio con l'aria ambiente, mentre solo molto lentamente l'acqua si sposterà dalle parti più interne verso l'esterno: viene così a stabilirsi il cosiddetto "gradiente di umidità", che dà luogo a sensibili divergenze nel ritiro, e quindi a tensioni da un punto all'altro del legno.

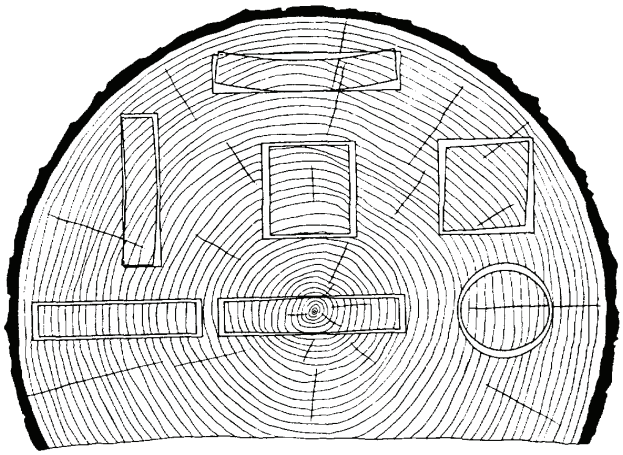


Figura 2.9: deformazioni del legno dovute al processo di essiccazione o di stagionatura (da Tsoumis).

Proprio le tensioni causate dall'irregolarità del ritiro sono all'origine di svariate conseguenze, diverse a seconda dell'assortimento cui appartiene l'elemento considerato.
Nel caso di tronchi non squadrati si possono verificare "cretti" a zampa di gallina sulle testate, con origine nell'asse midollare, dovuti alla differenza fra le tensioni da ritiro della parte interna del tronco, ancora umida, e quelle della parte periferica più secca: in tutte e tre le direzioni il ritiro sulle testate è maggiore che nella parte interna, quindi esse, poste fortemente in tensione, a un certo punto si spaccano, cominciando dal midollo e seguendo le linee di minore resistenza, i raggi parenchimatici.
Analogamente sulla superficie esterna dei tronchi l'essiccazione è più rapida che all'interno, i ritiri avvengono prima e in conseguenza si hanno fini fessurazioni longitudinali radiali, le quali, se non sono molto profonde, non costituiscono un grave inconveniente.
Il fatto che il ritiro tangenziale sia maggiore di quello radiale porta alla formazione di spacchi o "cretti" in direzione radiale, aperti a "V" dal midollo verso l'esterno, che non c'è modo di prevenire; la presenza di una sola spaccatura indica in genere che è avvenuta un'essiccazione lenta e regolare: è la situazione preferibile anche in vista delle successive lavorazioni, perché il materiale risulta essere meno danneggiato.

Molti sono gli effetti del ritiro anche nel caso di assortimenti segati ed asciati (travi, tavole, listelli...) fra cui i più evidenti sono diminuzione dimensionale, imbarcamento, fessurazioni sulle testate, svergolamento.
La diminuzione delle dimensioni con l'essiccazione è inevitabile e di essa va tenuto conto al momento del taglio del pezzo: si deve calcolare una maggiorazione di spessori e larghezze all'atto della lavorazione che va dal 2% al 6%, a seconda della specie legnosa e dell'umidità presente al momento. E' evidente che la differenza da considerare sarà tanto più importante nel caso di pezzi dalle dimensioni notevoli.
Un'altra conseguenza inevitabile, perché dipendente da caratteristiche intrinseche del materiale, è l'imbarcamento, che può però essere ridotto al minimo con una vaporizzazione subito dopo il taglio - per uniformare l'umidità in tutto l'elemento - e con un'essiccazione lenta e regolare. L'imbarcamento riguarda soprattutto le tavole ed è di diversa entità a seconda della posizione che esse hanno nel tronco rispetto al midollo; la caratteristica curvatura, con la concavità verso la parte opposta al centro del tronco, è dovuta infatti alle coppie di forze che si stabiliscono a causa dei ritiri radiale e tangenziale.

Figura 2.10: cretto da ritiro su una trave.

Nella tavola radiale/diametrale, contenente il midollo, le forze in gioco sono minime e non si hanno coppie, quindi non vi sarà alcun imbarcamento, ma a tavola sarà interessata sullo spessore da soli ritiri tangenziali e sulla larghezza dal solo ritiro radiale; a mano a mano che la tavola si allontana dalla posizione diametrale per assumere la posizione di corda via via più piccola, la prevalenza della coppia dovuta alle forze di ritiro tangenziale si farà più forte e la tavola subirà un imbarcamento maggiore, nel senso che il raggio di curvatura si farà più piccolo.
Anche lo sciavero, cioè la parte più esterna del tronco, che ha una sezione a forma di segmento circolare, è soggetto all'imbarcamento e viene così ad avere dopo l'essiccamento sezione a forma lenticolare.
Analogamente a quanto già detto a proposito dei tronchi, l'essiccazione più rapida delle testate rispetto alla parte mediana porta su tavole e travi alla formazione di fenditure di testa in direzione longitudinale, che si possono evitare avendo cura di non esporre le testate al sole durante l'essiccazione o proteggendole con sostanze che ritardino l'uscita di umidità localizzata.
Un fenomeno con conseguenze particolarmente negative è lo svergolamento: esso si ha quando la tavola sia stata ricavata da un albero con fibratura elicoidale. Lo stesso effetto si può avere quando il ritiro assiale della zona mediana longitudinale di una tavola è molto superiore a quello delle zone laterali, ma non è accompagnato da tensioni sufficientemente forti da provocare distacco tra due parti laterali; gli spigoli assumono allora andamento elicoidale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Giordano G. (1988), *Tecnologia del legno*, UTET, Torino.
[2] Tsoumis G. (1991), *Science and technology of wood: structure, properties, utilization*, Chapman & Hall.

2.3 DIFETTI E CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL LEGNO STRUTTURALE

Le prestazioni di un elemento strutturale di legno sono in gran parte legate alla presenza ed alla posizione di alcune caratteristiche che, dal punto di vista applicativo, sono in certi casi considerate difetti. Una breve descrizione della loro origine e del loro effetto sulle prestazioni strutturali è certamente utile per aumentare la conoscenza del legno, un materiale di origine biologica e pertanto completamente naturale e variabile.

Ampiezza degli anelli di accrescimento. Questo parametro, di facile valutazione sulle superfici trasversali, è in parte correlato con la massa volumica del legno e quindi con la sua rigidezza e la sua resistenza meccanica. Generalmente, per le Conifere, ad un aumento di ampiezza degli anelli corrisponde una diminuzione della massa volumica e quindi della resistenza meccanica. Per questo motivo, varie normative per la classificazione dei segati secondo la resistenza considerano l'ampiezza media degli anelli di accrescimento un indice diretto di valutazione delle resistenze meccaniche dell'elemento ligneo. Ma la regolarità di accrescimento è un fattore ancora più importante. In climi freddi o con moderate escursioni termiche, come quello Scandinavo o di alcune vallate Alpine, cresce il legno di Conifera considerato di maggior pregio, caratterizzato da anelli sottili e regolari. Per le Latifoglie, invece, la suddetta relazione è più articolata: ad esempio nel caso di quelle ad anello poroso (Querce caducifoglie) anelli ampi sono generalmente indice di un legno più denso.

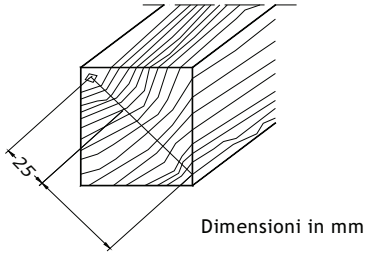


Figura 2.11: Misurazione dell'ampiezza degli anelli di accrescimento secondo UNI EN 1310; si considera il valore medio misurato su almeno 10 anelli escludendo quelli a meno di 25 mm dal midollo (se presente).

Nodi. I nodi rappresentano l'inclusione della parte basale di un ramo all'interno di un fusto. Dal momento che i rami sono elementi indispensabili per un albero vivente, la presenza dei nodi è difficilmente evitabile. Legno privo di nodi (legno netto) viene prodotto solo nella porzione basale ed esterna del fusto, in corrispondenza della quale i rami cadono naturalmente o vengono artificialmente eliminati con le potature. Esistono due tipologie prevalenti di nodi:

- **nodi cadenti** (nodi morti) sono quelli che possono staccarsi dalla superficie del semilavorato: al momento dell'inclusione nel legno, il ramo era già morto (secco) e durante il successivo accrescimento dell'albero è stato inglobato dal legno circostante;
- **nodi aderenti** (nodi sani) sono invece quelli in cui c'è continuità tra il legno del nodo e quello del fusto, e derivano dall'inclusione di rami ancora vivi.

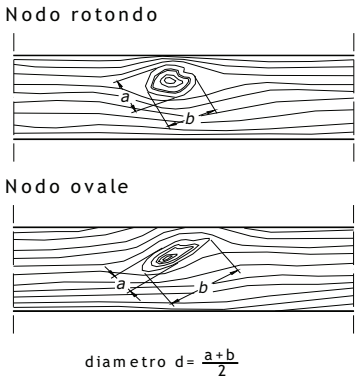


Figura 2.12: Misurazione di nodi singoli secondo UNI EN 1310.

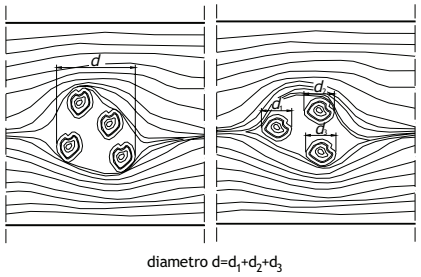


Figura 2.13: Misurazione di gruppi di nodi secondo UNI EN 1310.

I nodi possono avere forma e dimensioni molto diverse: le Figura 2.12, Figura 2.13 e Figura 2.14 illustrano alcune tipologie di nodo e le relative modalità di misurazione secondo UNI EN 1310, mentre la Figura 2.15 mostra l'influenza di un nodo (sano o cadente non fa differenza) sulla sezione resistente dell'elemento. In alcune norme per la classificazione del legno secondo la resistenza, vedi ad es. la norma UNI 11035, le dimensioni dei nodi invece devono essere rilevate misurandone il diametro minore.

La resistenza meccanica del legno può risultare considerevolmente ridotta a causa dei nodi, in base soprattutto al tipo, alle dimensioni (in rapporto alla sezione), alla loro posizione e alle modalità di applicazione delle sollecitazioni. I nodi, inoltre, possono influenzare la lavorabilità e le possibilità di incollaggio del legno. Le caratteristiche dei nodi costituiscono quindi un importante criterio di riferimento per la classificazione dei segati, tanto in funzione della loro resistenza che del loro impiego in falegnameria. Nel caso di legno strutturale i nodi con diametro inferiore ai 5 mm vengono ritenuti ininfluenti sulla resistenza meccanica.

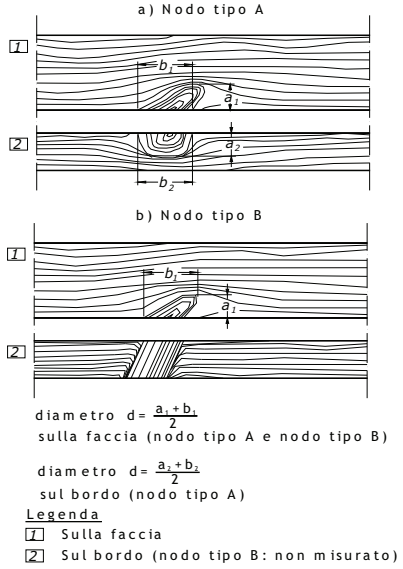


Figura 2.14: Definizione e misurazione di nodi singoli sul bordo secondo UNI EN 1310.

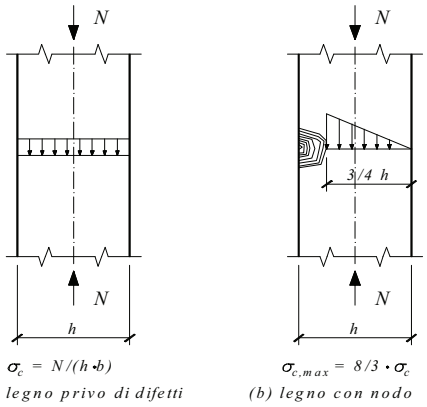


Figura 2.15: Influenza di un nodo sulla resistenza di un elemento strutturale; la distribuzione delle tensioni cambia e la tensione applicata aumenta.

Midollo. Il midollo corrisponde alla traccia lasciata dalla gemma apicale dell'albero all'interno del tronco: da un punto di vista dell'impiego del legno, costituisce un difetto, in quanto la sua presenza può ridurre la resistenza meccanica dei semilavorati. Ciò è dovuto alla diversa struttura cellulare e chimica di questo tessuto rispetto al legno circostante. Inoltre, in prossimità del midollo si riscontra spesso un'elevata frequenza di nodi e, nei fusti degli alberi più vecchi, possono a volte presentarsi fessurazioni del cuore e marcescenze. La segagione di un tronco può includere od escludere la presenza di midollo, e determinarne la posizione nel segato. Occorre ricordare che i segati con midollo incluso, nel corso della stagionatura tendono a manifestare le tipiche fessurazioni da ritiro a "V".

Inclinazione della fibratura. L'inclinazione della fibratura rappresenta l'orientamento longitudinale delle cellule dei tessuti legnosi rispetto all'asse principale del segato; l'angolo di inclinazione può essere molto variabile. La fibratura inclinata è un difetto molto comune sia del legno di conifere che di latifoglie (che in molte specie legnose può presentare anche deviazioni localizzate); in realtà fusti con fibratura perfettamente diritta sono piuttosto rari.
La fibratura inclinata può avere conseguenze anche rilevanti sulle possibilità d'impiego del legno: la resistenza meccanica può diventare considerevolmente inferiore a quella del legno normale in funzione del valore dell'angolo di inclinazione e del tipo di sollecitazione e, soprattutto, viene ridotta la sua resilienza, cioè la capacità di assorbire urti. La fibratura inclinata influenza ugualmente le deformazioni, la lavorabilità, l'essiccazione e la finitura delle superfici del legno. A titolo di esempio, si riportano i fattori di riduzione della resistenza a flessione $f_{m,\alpha,k}$ in funzione dell'angolo α di deviazione della fibratura rispetto all'asse longitudinale dell'elemento (Tabella 2.1). Una fibratura leggermente inclinata può prodursi anche a partire da legno con fibratura perfettamente diritta, in seguito alla segagione dei tronchi secondo una certa angolazione (in particolare nel caso di fusti molto rastremati o che presentano una circonferenza irregolare o un accrescimento eccentrico).

pendenza	0	1:25	1:20	1:15	1:10
$f_{m,\alpha,k} / f_{m,k}$	1,00	0,88	0,86	0,78	0,62

Tabella 2.1: Influenza dell'inclinazione della fibratura sulla resistenza a flessione. Valori applicabili a segati in dimensioni d'uso strutturale, per una deviazione generale della fibratura lungo l'intero elemento.

Secondo la norma UNI EN 1310 l'inclinazione della fibratura può essere misurata sulla faccia di un elemento di legno con una punta per tracciare, munita di un braccio e di un'impugnatura mobile (vedi Figura 2.16). L'esperienza pratica dimostra però che questo metodo risulta spesso inefficace, per cui per una valutazione più precisa dell'angolo di inclinazione della fibratura si consiglia di osservare, quando si manifestano, l'andamento delle fessurazioni da ritiro.

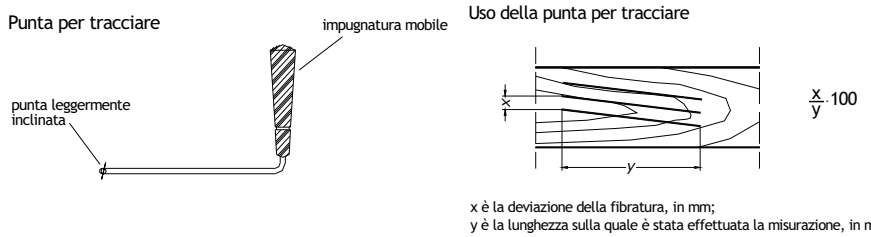

Punta per tracciare
impugnatura mobile
punta leggermente inclinata
Uso della punta per tracciare
x
y
x/y · 100
x è la deviazione della fibratura, in mm;
y è la lunghezza sulla quale è stata effettuata la misurazione, in mm.

Figura 2.16: Metodo per la misurazione dell'inclinazione della fibratura (UNI EN 1310). A sinistra il particolare dell'utensile; a destra l'uso dell'utensile.

Fessurazioni (o cretti) da ritiro. Le fessurazioni da ritiro si manifestano quando l'umidità del legno scende sotto il 30% (ovvero il punto di saturazione delle fibre), e sono più evidenti quando nel segato è presente il midollo. L'origine delle fessurazioni è da attribuirsi al ritiro dimensionale del legno, che è maggiore nella direzione tangenziale rispetto a quella radiale. Durante la stagionatura si sviluppano delle tensioni all'interno del legno che portano all'apertura di fessurazioni con sezione a "V", aperta verso la corteccia e chiusa verso il midollo. Queste fessurazioni hanno un'influenza sulla resistenza meccanica solo se decorrenti sul piano orizzontale (nel caso di un elemento inflesso).
La presenza di fessurazioni è dunque indice del fatto che il legno è almeno parzialmente stagionato. L'andamento longitudinale delle fessurazioni da ritiro fornisce, come già ricordato, un'indicazione precisa dell'inclinazione della fibratura.

Cipollatura. La cipollatura è una separazione tra i tessuti legnosi, che segue l'andamento di uno o più anelli di accrescimento; questo difetto, a volte già presente sugli alberi in piedi, può progredire ulteriormente dopo l'abbattimento e la stagionatura in seguito allo sviluppo di tensioni interne da accrescimento o da ritiro. Le cipollature possono essere complete o parziali, singole o multiple (Figura 2.17).

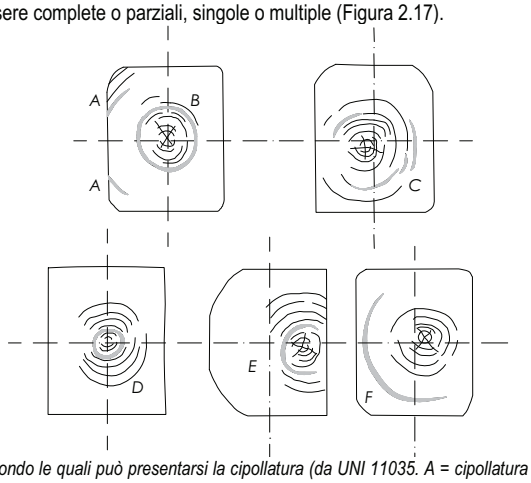


Figura 2.17: Modalità secondo le quali può presentarsi la cipollatura (da UNI 11035. A = cipollatura affiorante; B = cipollatura completa e inclusa; C = cipollatura multipla; D = cipollatura ammissibile; E = cipollatura inammissibile per eccessiva eccentricità; F =cipollatura inammissibile per eccessivo sviluppo).

Le cipollature si possono verificare all'interno di anelli particolarmente ampi o in coincidenza di un'improvvisa variazione di ampiezza tra due anelli contigui. Alcune specie legnose, soprattutto se provenienti da determinate

aree geografiche, sono particolarmente soggette a cipollatura: Castagno, Abete bianco, Larice ed alcuni Eucalipti sono le più note. Se la causa di tale difetto non è ancora completamente nota, l'effetto è ben conosciuto: una grave soluzione di continuità che comporta una forte diminuzione della resistenza meccanica dell'elemento e l'impossibilità di ottenere determinate sezioni dalla segagione dei tronchi (a causa della separazione degli anelli in corrispondenza della cipollatura).

Legno di reazione. Questo difetto può formarsi sia nel legno di Conifera (legno di compressione) che in quello di Latifoglia (legno di tensione). In genere il legno di compressione si forma nella parte inferiore (compressa o sottovento) della sezione trasversale di un fusto inclinato di Conifera, mentre il legno di tensione si forma in quella superiore (tesa o sopravvento) di un fusto inclinato di Latifoglia. Entrambi sono comunemente noti anche con il termine più generico di "legno di reazione", per evidenziare che essi si formano per annullare gli effetti di una forza esterna che agisce sollecitando il fusto. Il legno di compressione e quello di tensione (Tabella 2.2) presentano alcune similitudini, tuttavia essi differiscono per molte particolarità:

	Legno di compressione (Conifere)	**Legno di tensione (Latifoglie)**
Composizione.	più lignina	più cellulosa
Colore	rosso scuro	bianco, cotonoso
Ritiri	assiale molto elevato; radiale e tangenziale inferiore al normale	assiale elevato; radiale e tangenziale normale
Comportamento	tende a separasi dal legno normale	presenta forti fessurazioni e collassi

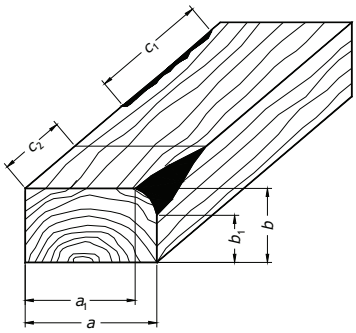
Tabella 2.2: Caratteristiche del legno di reazione.

Mentre la rilevazione del legno di compressione può essere relativamente facile sulle facce o sulle testate di segati e tronchi a causa della colorazione più scura, il legno di tensione è difficilmente individuabile se non attraverso il trattamento chimico del legno o la sua osservazione al microscopio.

Rimargini (cicatrizzazioni), inclusioni di corteccia. L'albero in genere reagisce ad una ferita formando una massa di cellule denominate "callo cicatriziale" grazie al quale, gradualmente, in base alla sua estensione e gravità, la ferita viene rimarginata. Una lesione esterna può anche determinare la produzione di sacche e canali traumatici: resiniferi, nel legno di conifere, e gommiferi, in quello di latifoglie. I canali resiniferi traumatici si possono tra l'altro formare anche nel legno di Abete bianco, Cedri, Cipressi e di altre specie prive di canali resiniferi. Durante il processo di cicatrizzazione, alcune porzioni di corteccia possono essere inglobate nel legno determinando le "inclusioni di corteccia"; inclusioni di corteccia si hanno anche in corrispondenza di una biforcazione dell'asse principale e di un concrescimento di due o più rami/fusti. A volte è possibile riscontrare nel fusto la formazione di zone di barriera (tessuti di compartimentazione generati in seguito a traumi) che svolgono un'azione di protezione nei confronti di un ulteriore sviluppo di lesioni o infezioni di agenti patogeni. Tali zone, tuttavia, sono spesso considerate difetti in quanto presentano una struttura del legno meccanicamente più debole e possono dare origine alla formazione di cipollature.

Colorazioni anomale. Le colorazioni anomale del legno possono avere varia origine: possono essere dovute ad attacchi parassitari, a ferite, o essere associate a legno di reazione ma, in alcuni casi, la causa non è certa. Esse non hanno generalmente conseguenze dal punto di vista meccanico. Alcuni esempi sono: inclusioni di alburno nel durame del legno di Larice, Abete rosso, Douglasia, Rovere ed Eucalipto; "cuore rosso" del Faggio; "cuore bruno" del Frassino; "cuore verde" di molti Pioppi, vena verde del ciliegio, vena nera del noce.

Smussi. Gli smussi sono una superficie arrotondata che raccorda due facce di un elemento e quindi rappresentano una riduzione della sezione in un segato ricavato nella parte periferica del tronco, oppure non completamente prismatico. In alcuni assortimenti per uso strutturale (travi uso Fiume e uso Trieste), gli smussi vengono tollerati ed anzi ne costituiscono una peculiarità estetica. Gli assortimenti contenenti smussi necessitano di particolari accorgimenti nel caso di unione con altri elementi strutturali.



$$w_f = \frac{a - a_1}{a}$$

$$w_e = \frac{b - b_1}{b}$$

w_f è la larghezza dello smusso sulla faccia espressa come frazione decimale;
w_e è la larghezza dello smusso sul bordo espressa come frazione decimale;
a è la larghezza totale della faccia in mm;
a_1 è la larghezza della faccia ridotta dallo smusso in mm;
b è la largezza totale del bordo in mm;
b_1 è la lrghezza del bordo ridotto dallo smusso in mm;
c è la lunghezza dello smusso in cm oppure in percentuale della lunghezza.

Figura 2.18: Misurazione dello smusso secondo UNI EN 1310. Attualmente nella norma UNI 11035 lo smusso si misura come rapporto tra la dimensione obliqua ed il lato maggiore del segato.

Deformazioni. Le deformazioni sono variazioni della forma geometrica di un elemento rispetto a quella di un prisma e si manifestano con la stagionatura del legname, in conseguenza di fibratura deviata oppure per la presenza di legno di reazione.

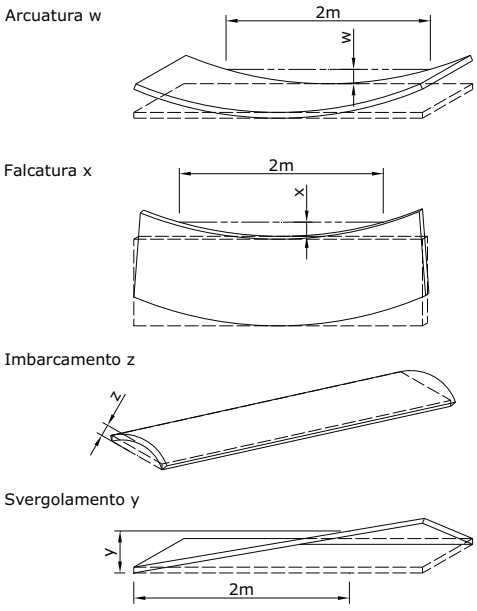


Figura 2.19: Diverse tipologie di deformazioni che possono manifestarsi su una tavola nel corso della stagionatura/essiccazione del legno.

Altri difetti che possono influenzare il comportamento meccanico del legno sono attribuibili ad azioni di degrado biologico (funghi ed insetti) ed abiotico (si vedano i paragrafi 2.5 e 2.6).

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche e le possibilità d'impiego dei differenti legnami per usi strutturali, si può fare riferimento al paragrafo 2.4 "Classificazione del legno strutturale", e 3.1 "Legno massiccio". Nel primo sono riportati i profili resistenti dei più comuni tipi di legnami presenti in Italia classificabili a vista

utilizzando la norma UNI 11035 oppure la norma DIN 4074, mentre nel secondo è riportata una sintesi delle principali caratteristiche delle specie legnose di più frequente impiego in ambito strutturale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] AA.VV.(2003), *Il legno massiccio in edilizia*, FEDERLEGNO-ARREDO, Milano.
[2] Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno,* Hoepli.
[3] Lavisci P. (2006), *La progettazione delle strutture di legno,* IlSole24Ore Milano.
[4] UNI EN 1310 – "Legno strutturale - Metodo di misurazione delle caratteristiche".
[5] UNI 11035 - "Legno strutturale – Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale".
[6] DIN 4074 – "Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit".

2.4 CLASSIFICAZIONE DEL LEGNO STRUTTURALE

L'elevata variabilità naturale delle caratteristiche morfologiche e meccaniche del legno ha portato alla necessità di definire criteri e regole di classificazione in base alla resistenza, al fine di ottimizzarne gli impieghi strutturali. La classificazione secondo la resistenza è un processo di selezione attraverso il quale ogni singolo pezzo di legno può essere inserito in una categoria (gruppo), così da attribuirgli valori affidabili di resistenza e rigidezza. Le regole di classificazione sono state sviluppate a fronte di migliaia di prove distruttive, mediante procedure codificate da norme tecniche e decenni di esperienza applicativa.

Le norme relative alla classificazione indicano quali sono le caratteristiche ed i difetti ammissibili nelle diverse classi di resistenza, per una data specie legnosa o gruppo di specie, e per una provenienza geografica. La classificazione può essere eseguita "a vista" o "a macchina" (la norma di riferimento è la UNI EN 14081). In entrambi i casi, lo scopo è l'assegnazione del singolo elemento ad una categoria o a una classe di resistenza (gruppo di tipi di legname con proprietà di resistenza simili e quindi intercambiabili), in genere armonizzate con quelle definite dalla UNI EN 338. Entrambe le metodologie di classificazione, se correttamente adottate, permettono un più razionale impiego del legno massiccio attraverso un favorevole dimensionamento delle strutture. Per le esigenze di progettazione, la classificazione secondo la resistenza è espressa da una serie di profili prestazionali per le specie legnose e le classi di qualità più frequentemente usate. Il valore di riferimento che viene riportato nei profili prestazionali è, o il valore medio, o più frequentemente il valore caratteristico, ovvero il valore del frattile della distribuzione assunta da una proprietà meccanica (generalmente il quinto percentile inferiore), determinato secondo il metodo previsto dalla UNI EN 384.
Con la pubblicazione del D.M. 14-09-2005 e come confermato dal D.M. 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni," anche in Italia è stato di fatto sancito l'obbligo di classificare secondo la resistenza il legname utilizzato per scopi strutturali. Secondo quanto riportato nel testo infatti "Il legno massiccio per uso strutturale è un prodotto naturale selezionato, in dimensioni d'uso nelle strutture, classificato, elemento per elemento, secondo la resistenza, sulla base di specifiche normative".
Inoltre, con l'entrata in vigore dell'obbligo della marcatura CE per il legname massiccio (attualmente prevista per il settembre 2009), la classificazione secondo la resistenza diverrà un passaggio imprescindibile per l'impiego di questo materiale.

La **classificazione a vista** assegna ciascun segato ad una classe di resistenza o a categorie sulla base di alcune caratteristiche facilmente rilevabili.
I metodi di valutazione delle varie caratteristiche sono generalmente quelli prescritti dalla norma UNI EN 1310, salvo quanto diversamente specificato nelle singole norme di classificazione.
In particolare le caratteristiche o i difetti che devono essere valutati sono:

- l'ampiezza media degli anelli di accrescimento, o eventualmente la massa volumica del legno;
- la tipologia, posizione, frequenza e dimensione dei difetti quali:
  - nodi, misurati tramite il rapporto tra il diametro e la sezione di riferimento;
  - deviazione della fibratura ;
  - legno di reazione;
  - attacchi di insetti o agenti di carie del legno;
  - deformazioni;
  - smussi;
  - fessurazioni da ritiro;
  - lesioni meccaniche;
  - cipollature (ammesse con limitazioni solo dalla norma UNI 11035 per il legname italiano di castagno, larice, abete centro Italia, mentre sono escluse da tutte le altre norme di classificazione);
  - altro (inclusioni di corteccia, vischio….).

Le normative prevedono che la classificazione degli elementi strutturali debba essere effettuata ad un umidità del legno inferiore o uguale al 20%: altrimenti infatti non è possibile valutare tutte le caratteristiche del legname ed in particolare le deformazioni, e le fessurazioni da ritiro. Anche l'inclinazione della fibratura non può essere rilevata facilmente. Questa prescrizione contrasta palesemente con la consuetudine diffusa soprattutto in Italia di mettere in opera il legname non stagionato, specialmente laddove si utilizzano rilevanti sezioni degli elementi. Nella pratica è sempre opportuno verificare tutti i requisiti richiesti dalle regole di classificazione, eventualmente anche una volta che il materiale è stato trasportato in cantiere prima della messa in opera.
La classificazione a vista richiede personale esperto e qualificato e generalmente comporta una sottostima delle caratteristiche meccaniche dei segati migliori (quindi è a favore di sicurezza). La classificazione a vista è però ampiamente consolidata dall'esperienza, da molti riscontri di prove meccaniche ed ha quindi larga diffusione su scala mondiale. Le regole di classificazione sono diverse nei vari Paesi, in funzione delle tipologie di specie

legnose e delle tradizioni nella lavorazione, ma seguono necessariamente gli stessi principi (indicati nella norma UNI EN 14081) per giungere a risultati molto simili. La norma UNI EN 1912 riporta la corrispondenza tra le sigle adottate nelle norme di classificazione nazionali e il sistema di classi di resistenza definite dalla UNI EN 338.
Per il legname strutturale Italiano (ovvero ricavato da alberi cresciuti in Italia), la norma UNI 11035 fissa le regole da adottare per effettuare la classificazione a vista. Nella attuale versione della norma (che sarà revisionata nel corso del 2009) le "categorie" della UNI 11035 non coincidono con le "classi di resistenza" della UNI EN 338 (Tabella 2.5) e pertanto gli elementi, classificati come indicato nella Tabella 2.3, sono assegnati a "categorie" associate ad opportuni "profili resistenti" (Tabella 2.4a e Tabella 2.5b). Il progettista che desidera utilizzare legname Italiano deve quindi fare attenzione nello scrivere la voce di capitolato, indicando ad esempio "Abete/Nord categoria S2", oppure "Querce caducifoglie/ Italia categoria S" facendo sempre riferimento alla norma UNI 11035.
La non corrispondenza tra le categorie della UNI 11035 e le classi di resistenza UNI EN 338 riportate nella UNI EN 1912 al momento sembra costituire un ostacolo alla possibilità di marcare CE il legname italiano, secondo l'interpretazione di alcuni Enti Notificati responsabili delle procedure di marcatura. Una proposta di corrispondenza tra le categorie UNI 11035 e le classi di resistenza secondo UNI EN 338 è riportata nel Capitolo 3, par.6. (Tabella 3.28).
Nella pratica commerciale, la classe di resistenza del legno massiccio, soprattutto di conifera proveniente da Austria, Germania, Svizzera e Alto Adige, viene tradizionalmente indicata utilizzando le classi della norma DIN 4074, che fa riferimento al sistema delle classi di resistenza della UNI EN 338.

La **classificazione a macchina** è stata sviluppata nei paesi anglosassoni a partire dagli anni '60 e si basa su criteri oggettivi che prendono in considerazione le reali prestazioni meccaniche dell'elemento. La macchina misura uno o più parametri prestazionali (generalmente il modulo di elasticità apparente e "locale" a flessione, in vari punti del segato), attribuendo automaticamente ad ogni pezzo una classe di resistenza normalizzata, evidenziata mediante apposita marcatura. L'attribuzione di una categoria si basa sulla correlazione tra il parametro rilevato dalla macchina e le caratteristiche meccaniche del pezzo (in genere la resistenza a flessione). L'affidabilità statistica della correlazione deve essere stata verificata tramite un'ampia serie di prove preliminari su un campione rappresentativo della produzione in esame. Un controllo finale del segato consente poi di individuare quei difetti (attacchi di funghi ed insetti, nodi o fessurazioni di testata, legno di reazione) di cui la macchina può non aver rilevato l'influenza. La classificazione a macchina è pertanto più veloce ed efficace di quella a vista, ma richiede apparecchiature costose e personale qualificato per le necessarie operazioni di taratura, che viene normalmente riscontrata da un Ente indipendente. Altri sistemi di classificazione a macchina, attualmente in forte diffusione, si basano su una combinazione di diverse strumentazioni, in particolare: rilevazione del modulo di elasticità dinamico (con un metodo vibrazionale), scansione raggi X e laser per la localizzazione e la valutazione dei difetti del legname importanti ai fini della resistenza meccanica, misura delle dimensioni degli elementi, misura delle deformazioni, misura della densità e dell'umidità del legno.
Le normative riportate in questo paragrafo sono in costante aggiornamento, in conseguenza di un forte interesse commerciale per il mercato del legno strutturale, delle importanti novità normative, ed in vista della obbligatorietà della marcatura CE del legno massiccio. Vi sono inoltre alcune questioni attualmente non risolte o in corso di discussione che negli anni a venire porteranno ad ulteriori modifiche delle attuali regole. In particolare si possono ricordare i seguenti aspetti:

- **Classificazione del legname tipo Uso Fiume e Uso Trieste**
  Attualmente questi assortimenti (molto importanti nel mercato italiano del legno strutturale) non possono essere classificati con le normative europee, ad eccezione della norma UNI 11035 e quindi solo se di provenienza italiana. Inoltre la regola di classificazione applicabile prescrive che, a causa dell'eccessivo smusso, si debba attuare una riduzione della sezione resistente, a scapito quindi di un uso razionale del legname. Per ovviare a questa penalizzazione sono in corso prove sperimentali su travi Uso Fiume e Trieste in modo da ricavare degli specifici profili prestazionali per questi assortimenti. Inoltre la norma quadro UNI EN 14081 attualmente non prevede la possibilità di classificare gli elementi Uso Fiume e Trieste, negando di fatto l'autorizzazione alla marcatura CE di questo legname.

- **Aggiornamento norma UNI 11035**
  La norma UNI 11035 è in corso di aggiornamento, essendosi resi disponibili ulteriori dati sperimentali relativi ad alcune specie italiane. I nuovi dati sono stati ricavati in maniera conforme alla UNI EN 384, come prescritto dalla UNI EN 14081, e pertanto i profili prestazionali delle categorie riportate nella Tabella 2.3, Tabella 2.4a, Tabella 2.5b in alcuni casi verranno modificati. Inoltre è previsto di inserire nella nuova versione della norma regole di classificazione e profili prestazionali specifici per gli assortimenti Uso Fiume e Trieste (per abete bianco e rosso ed eventualmente per castagno e larice). L'aggiornamento dei profili prestazionali consentirà anche di individuare le corrispondenze delle categorie UNI 11035 con le classi di resistenza della UNI EN 338, rendendo di fatto più agevole la marcatura CE del legname italiano.

- **Modifiche alla norma UNI EN 338**
  Anche il testo della norma UNI EN 338 è in corso di aggiornamento; in particolare è previsto l'inserimento di ulteriori classi di resistenza all'interno del gruppo delle latifoglie. Per quanto riguarda il legname italiano sarebbe di particolare interesse individuare una classe di resistenza idonea per il legname di castagno, che attualmente non trova una collocazione in nessuna di quelle esistenti.

CRITERI PER LA CLASSIFICAZIONE	**CONIFERE - Categoria**			**LATIFOGLIE - Categoria**
	S1	**S2**	**S3**	**S**
Smussi [1]	$s \leq 1/8$	$s \leq 1/3$	$s \leq 1/2$	$s \leq 1/4$
	e comunque ciascun lato della sezione non deve essere interessato da smussi per almeno			
	2/3	1/3	1/2	2/3
Nodi singoli [2]	$A \leq 1/5$ e comunque d <50 mm	$A \leq 2/5$ e comunque d <70 mm	$A \leq 3/5$	$A \leq 1/2$ e comunque: $d \leq 70$ mm; $D \leq 150$ mm
Nodi raggruppati [3]	$A_g \leq 2/5$	$A_g \leq 2/3$	$A_g \leq 3/4$	$W \leq 1/2$ e comunque: $t \leq 70$ mm
Ampiezza anelli	≤ 6 mm	nessuna limitazione		
Massa volumica [4]	nessuna limitazione			$\rho > \rho_{min}$
Inclinazione fibratura	≤ 1:14	≤ 1:8	≤ 1:6	
Fessurazioni da ritiro	non passanti	ammesse senza limitazioni		ammesse con limitazioni [5]
Cretti da gelo, lesioni	non ammesse			
Cipollatura	non ammessa	ammessa con limitazioni [6]		
Degrado da funghi (carie)	non ammesso			
Azzurramento	ammesso			
Legno di reazione	fino a 1/5 della superficie o della sezione	fino a 2/5 della superficie o della sezione	fino a 3/5 della superficie o della sezione	nessuna limitazione
Attacchi di insetti	non ammessi	ammessi con limitazioni [7]		
Vischio	non ammesso			
Deformazioni:				
- Arcuatura	10		20	10
- Falcatura	8		12	8
- Svergolamento	1 mm su 25 mm di larghezza		2 mm su 25 mm	1mm su 25 mm di larghezza
- Imbarcamento	nessuna restrizione		nessuna restrizione	nessuna restrizione

[1] s è il rapporto fra la dimensione obliqua dello smusso e il lato maggiore della sezione.
[2] Si considera il nodo più grande del segato, e se ne misura il diametro minimo d, nonché il diametro massimo D. Si definisce inoltre A il rapporto fra d e la larghezza della faccia su cui d stesso viene misurato.
[3] Conifere: Non considerare questo criterio per Abete/Nord e Larice/Nord. Per le altre combinazioni specie/provenienza considerare il rapporto Ag fra la somma dei diametri minimi dei nodi compresi in un tratto di 150 mm e la larghezza della faccia su cui compaiono. Latifoglie: Si considera la somma t dei diametri minimi dei nodi compresi in un tratto di 150 mm. Si definisce inoltre W il rapporto fra tale somma e la larghezza della faccia su cui compaiono.
[4] Si applicano i seguenti valori di ρ_{min}: 395 kg/m^3 per Castagno/Italia; 415 kg/m^3 per Pioppo e Ontano/Italia; 510 kg/m^3 per Altre latifoglie/Italia; 740 kg/m^3 per Querce caducifoglie/Italia.
[5] Se passanti, sono ammesse solo su una testata, e con lunghezza max. pari a due volte la larghezza della sezione.
[6] Conifera: di norma non ammessa. Solo per Larice/Nord e Abete/Centro Sud, si considerano: il rapporto r_{max} fra il raggio massimo della cipollatura e il lato minore b della sezione; l'eccentricità ε cioè la distanza massima del midollo rispetto al centro geometrico della sezione. Latifoglia: La cipollatura è ammessa se $r_{max} < b/3$ ed $\varepsilon < b/6$. Di norma non ammessa. Solo per Castagno/Italia, si considerano: il rapporto r_{max} fra il raggio massimo della cipollatura e il lato minore b della sezione; l'eccentricità ε cioè la distanza massima del midollo rispetto al centro geometrico della sezione. La cipollatura è ammessa se $r_{max} < b/3$ ed $\varepsilon < b/6$. Questa nota, come altri aspetti saranno rivisti nella versione definitiva della norma UNI 11035.
[7] Ammessi solo fori con alone nerastro, oppure fori di Anobidi (purché l'attacco sia sicuramente esaurito) per un max. di 10 fori, distribuiti uniformemente, per metro di lunghezza (somma di tutte e quattro le facce).

Tabella 2.3: Classificazione a vista del legname Italiano (escluso Douglasia), secondo UNI 11035.

PROPRIETA'		Abete / Nord			Abete / Centro Sud			Larice / Nord		
		S1	S2	S3	S1	S2	S3	S1	S2	S3
Res. a flessione (5-perc.), N/mm^2	$f_{m,k}$	29	23	17	32	28	21	42	32	26
Res. a trazione parallela alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{t,0,k}$	17	14	10	19	17	13	25	19	16
Res. a trazione perpend. alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,6
Res. a compressione parallela alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{c,0,k}$	23	20	18	24	22	20	27	24	22
Res. a compressione perpend. alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{c,90,k}$	2,9	2,9	2,9	2,1	2,1	2,1	4,0	4,0	4,0
Res. a taglio (5-perc.), N/mm^2	$f_{v,k}$	3,0	2,5	1,9	3,2	2,9	2,3	4,0	3,2	2,7
Modulo di elasticità parallelo alla fibrat. (medio), N/mm^2	$E_{0,mean}$	12000	10500	9500	11000	10000	9500	13000	12000	11500
Modulo di elasticità parallelo alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$E_{0,05}$	8000	7000	6400	7400	6700	6400	8700	8000	7700
Modulo di elasticità perpend. alla fibrat. (medio), N/mm^2	$E_{90,mean}$	400	350	320	370	330	320	430	400	380
Modulo di taglio (medio), N/mm^2	G_{mean}	750	660	590	690	630	590	810	750	720
Massa volumica (5-perc.), kg/m^3	ρ_k	380	380	380	280	280	280	550	550	550
Massa volumica (media), kg/m^3	ρ_{mean}	415	415	415	305	305	305	600	600	600

Tabella 2.4a: Profili resistenti di abete e larice strutturale italiano, secondo UNI 11035.

PROPRIETA'		Douglasia		Castagno	Querce caducifoglie	Pioppo e Ontano	Altre Latifoglie
		S1	S2/S3	S	S	S	S
Res. a flessione (5-perc.), N/mm^2	$f_{m,k}$	40	23	28	42	26	27
Res. a trazione parallela alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{t,0,k}$	24	14	17	25	16	16
Res. a trazione perpend. alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,5	0,8	0,4	0,5
Res. a compressione parallela alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{c,0,k}$	26	20	22	27	22	22
Res. a compressione perpend. alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$f_{c,90,k}$	2,6	2,6	3,8	5,7	3,2	3,9
Res. a taglio (5-perc.), N/mm^2	$f_{v,k}$	4,0	3,4	2,0	4,0	2,7	2,0
Modulo di elasticità parallelo alla fibrat. (medio), N/mm^2	$E_{0,mean}$	14000	12500	11000	12000	8000	11500
Modulo di elasticità parallelo alla fibrat. (5-perc.), N/mm^2	$E_{0,05}$	9400	8400	8000	10100	6700	8400
Modulo di elasticità perpend. alla fibrat. (medio), N/mm^2	$E_{90,mean}$	470	420	730	800	530	770
Modulo di taglio (medio), N/mm^2	G_{mean}	880	780	950	750	500	720
Massa volumica (5-perc.), kg/m^3	ρ_k	400	420	465	760	420	515
Massa volumica (media), kg/m^3	ρ_{mean}	435	455	550	825	460	560

Tabella 2.5b: Profili resistenti del legname strutturale Italiano (Douglasia e latifoglie), secondo UNI 11035.

Valori caratteristici di tensione (MPa) e modulo elastico (GPa)		C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
Resistenza a flessione parallela alla fibratura	$f_{m,0,k}$	14	16	18	22	24	27	30	35	40
Res. a trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	8	10	11	13	14	16	18	21	24
Res. a trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Res. a compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16	17	18	20	21	22	23	25	26
Res. a compressione perpend. alla fibratura	$f_{c,90,k}$	4,3	4,6	4,8	5,1	5,3	5,6	5,7	6,0	6,3
Res. a taglio	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
Modulo elastico a flessione (val. medio)	$E_{0,mean}$	7	8	9	10	11	12	12	13	14
Modulo elastico a flessione (val. caratter.)	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4

Valori caratteristici di tensione (MPa) e modulo elastico (GPa)		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Resistenza a flessione parallela alla fibratura	$f_{m,0,k}$	30	35	40	50	60	70
Res. a trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Res. a trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,9
Res. a compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Res. a compressione perpend. alla fibratura	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Res. a taglio	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Modulo elastico a flessione (val. medio)	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
Modulo elastico a flessione (val. caratter.)	$E_{0,05}$	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8

Tabella 2.5: Classi di resistenza secondo UNI EN 338. Legno di Conifere e di Pioppo (C), Latifoglie (D).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] AA.VV. (2003), *Il legno massiccio in edilizia*, FEDERLEGNO-ARREDO, Milano.
[2] DIN 4074 – "Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit""
[3] Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano.
[4] Lavisci P. (2006), *La progettazione delle strutture di legno*, IlSole24Ore, Milano.
[5] UNI 11035 – 1 "Legno strutturale - Classificazione a vista di legnami italiani secondo la resistenza meccanica: terminologia e misurazione delle caratteristiche".
[6] UNI 11035 - 2 "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale italiani".
[7] UNI EN 338 – "Legno strutturale - Classi di resistenza".
[8] UNI EN 1912 – "Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie visuali e delle specie".
[9] UNI EN 14081 – 1 "Strutture di legno - Legno strutturale con sezione rettangolare classificato secondo la resistenza - Parte 1: Requisiti generali".
[10] UNI EN 384 – "Legno strutturale Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica".
[11] D.M. 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni".
[12] UNI EN 1310,- "Legno tondo e segati - Metodo di misurazione delle caratteristiche".

2.5 DEGRADAMENTO BIOLOGICO: DURABILITÀ NATURALE, PREVENZIONE E TRATTAMENTI PRESERVANTI

DURABILITÀ NATURALE E CONTESTO NORMATIVO EUROPEO

Il legno, essendo un materiale di origine naturale, è biodegradabile da batteri, funghi, insetti e organismi marini, i quali possono causare modificazioni dell'aspetto, della struttura e della composizione chimica. La resistenza che il legno oppone agli agenti che causano il suo biodegradamento è chiamata **durabilità naturale** e dipende principalmente dalla presenza di **estrattivi**, composti chimici di varia natura (terpeni, fenoli, tannini ecc.), che si depositano nelle cellule della parte più interna del fusto durante il processo di duramificazione. In alcune specie legnose gli estrattivi impartiscono al durame una colorazione più scura rispetto all'alburno, queste specie sono definite a durame differenziato.
Generalizzando possiamo dire che l'alburno di tutte le specie legnose è sempre non durabile nei confronti degli organismi xilofagi, mentre il durame, quando è differenziato, ha una notevole resistenza contro gli insetti e comportamento diverso da specie a specie nei riguardi degli attacchi fungini. La durata in servizio di una specie legnosa dipende sia dalla sua durabilità naturale sia dalle condizioni ambientali nelle quali il legno si trova in opera e dagli organismi xilofagi potenzialmente presenti, cioè dalle classi di utilizzo, definite nella Tabella 2.6 estrapolata e modificata rispetto alle tabelle presenti nelle norme UNI EN 335-1 ed UNI EN 335-2.

Classe di utilizzo	Umidità del legno	Agenti biologici	Esempio
1 (coperto all'interno)	Sempre inferiore o al massimo = 20%	Insetti (coleotteri, termiti se localmente presenti)	Mobili, parquet, perlinati ecc.
2 (coperto all'interno)	Occasionalmente > 20%	Insetti (coleotteri, termiti se localmente presenti) funghi basidiomiceti, funghi cromogeni muffe	Travature, soffitti, serramenti con adeguata copertura.
3.1 (non a contatto con il terreno)	Occasionalmente > 20% Non esposto alla pioggia		Serramenti esterni, infissi esterni, rivestimenti esterni, arredo urbano, mobili da giardino.
3.2 (non a contatto con il terreno)	Frequentemente > 20% esposto alla pioggia		
4.1 (a contatto con il terreno o con acqua dolce)	Prevalentemente o permanentemente > 20%	Insetti (coleotteri, termiti se localmente presenti, 4.1T, 4.2T), funghi basidiomiceti, funghi cromogeni muffe funghi della carie soffice	Pali, staccionate, arredo urbano, bordi piscine, sponde fluviali ecc
4.2 (piantato nel terreno o immerso in acqua dolce)	Permanentemente > 20%		
5 (immerso in acqua di mare)	Permanentemente > 20%	Funghi della carie soffice organismi marini perforanti; nella parte emersa coleotteri e termiti	Pali di fondazione, pontili pali da ormeggio ecc.

Tabella 2.6: Classi di utilizzo in accordo alla UNI EN 335-1.

Le cause del degradamento del legno in opera sono di origine diversa e variano dal deterioramento dovuto ad agenti abiotici (quali agenti chimici, umidità, eccesso di carico) al danno dovuto ad organismi. Il danno più rilevante è solitamente portato dall'azione di funghi e insetti, che si nutrono delle sostanze organiche di cui il legno è costituito o di quelle di riserva in esso presenti, sia quando ancora l'albero è in piedi e svolge le sue funzioni vegetative, che quando si trova in opera nelle strutture degli edifici: per questo sono definiti **organismi xilofagi**.
Se consideriamo un edificio civile ci dovremo trovare prevalentemente nelle classi di utilizzo 1, 2 e 3.1 in cui solo occasionalmente sono presenti condizioni di umidità ottimali per lo sviluppo di funghi. Spesso lo sviluppo di funghi è dovuto a infiltrazione di umidità nel tetto o sottotetto o nelle testate delle travi inserite nella muratura per errori nella progettazione o per eventi straordinari (rotture delle coperture o di tubi di conduzione dell'acqua).
Negli edifici il rischio di attacco da insetti, coleotteri (ubiquitari in Europa) e isotteri (termiti, non ubiquitarie ma che possono rappresentare un problema in alcune aree geografiche), può essere sempre presente se non sono state adottate misure di prevenzione. Comunque la scarsa durabilità naturale di una specie legnosa non comporta necessariamente l'impossibilità d'impiego: l'impregnazione con sostanze preservanti può infatti conferire al legno

anche un alto grado di durabilità. E' però necessario che il legno sia dotato di buone caratteristiche di impregnabilità.
Nella Tabella 2.7 sono definite le caratteristiche di durabilità naturale delle principali specie legnose utilizzate in edilizia. Tale tabella sintetizza ed in alcuni casi amplia i contenuti riportati nella norma UNI EN 350-2. Nella legenda sono riportate le classificazioni della durabilità naturale riguardo ai funghi, insetti coleotteri e termiti e la classificazione dell'impregnabilità del legno estratte dalla UNI EN 350-1. E' necessario inoltre ricordare la norma UNI EN 460 che mette in relazione la durabilità del legno ai funghi basidiomiceti con la classe di utilizzo (ancora denominate secondo la vecchia terminologia di classi di rischio di attacco biologico) e che permette di stabilire la necessità di applicare un trattamento preservante quando una specie legnosa è utilizzata in una determinata classe di utilizzo (Tabella 2.8).

Specie			**Durabilità naturale**						**Impregnabilità**	
Nome commerciale	**Nome scientifico**	**Origine**	**Funghi**	**Insetti coleotteri**				**Ter-miti**		
				Hyl.	**Hesp.**	**An.**	**Ly.**		**Durame**	**Alburno**
Abete bianco	*Abies alba* Mill.	EU, USA	4	NRH	R	NRH	R	NR	2-3	2
Abete rosso	*Picea abies* L. Karst.	EU	4	NRH	R	NRH	R	NR	3-4	3
Douglasia	*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco	USA EU	3 3-4	NR	R	NR	R	NR	4 2-3	3
Larice	*Larix decidua* Mill.	EU	3-4	NR	R	NR	R	NR	4	2
Pino silvestre	*Pinus sylvestris* L.	EU	3-4	NR	R	NR	R	NR	3-4	1
Castagno	*Castanea sativa* Mill.	EU	2	R	NR	NR	NR	MR	4	2
Pioppo	*Populus* spp.	EU	5	R	NR	NR	R	NR	3	1
Querce caducifoglie	*Quercus* spp	EU	2-4	R	NR	NR	NR	NR	4	1

Legenda:

Classi di durabilità naturale ai funghi
1 – molto durabile
2 - durabile
3 – moderatamente durabile
4 – poco durabile
5 – non durabile

Insetti del legno
Hyl. – Hylutrupes bajulus
Hesp. – Hesperoohanes cinereus
An. – Anobidi spp.
Ly. – Lyctus spp.
Term. – Termite spp.

Classi di impregnabilità del legno: A (alburno), D (durame)
1 – impregnabile
2 – moderatamente impregnabile
3 – poco impregnabile
4 – non impregnabile

Classi di durabilità naturale agli insetti isotteri o termiti
R – resistente
MR – moderatamente resistente
NR – non resistente

Classi di durabilità naturale agli insetti coleotteri
R – resistente
NR – non resistente
NRH – durame conosciuto come non resistente

Tabella 2.7: Durabilità naturale ai differenti organismi xilofagi delle principali specie legnose utilizzate in edilizia (tabella tratta e modificata dalla UNI EN 350-2). La durabilità ai funghi e alle termiti è riferita al durame, la durabilità agli insetti coleotteri è riferita all'alburno ad eccezione per i casi di specie legnose a durame indifferenziato e per alcune specie di insetti, in tali casi è riportata la sigla NRH.

Classe di rischio*	**Classe di durabilità**				
	1	2	3	4	5
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	(0)	(0)
3	0	0	(0)	(0) - (X)	(0) - (X)
4	0	(0)	(X)	X	X
5	0	(X)	(X)	X	X

Legenda:
0 durabilità sufficiente; (0) durabilità generalmente sufficiente ma in certi casi può essere raccomandato un trattamento preservante; (0)- X durabilità sufficiente ma in funzione della specie legnosa e della sua impregnabilità può essere necessario un trattamento preservante. (X) trattamento preservante normalmente raccomandato; X trattamento necessario.

*Tabella 2.8: Relazione tra classi di utilizzo e durabilità naturale del legno in funzione all'opportunità di applicazione di un trattamento preservante UNI EN 460 (*denominate classi di utilizzo nella UNI EN 335).*

DEGRADAMENTO DEL LEGNO: COLEOTTERI

Gli insetti coleotteri, a seconda della specie, attaccano il legno degli alberi quando sono ancora in piedi, il legno nei depositi/piazzali di stoccaggio ma anche i prodotti derivati in opera.
Nei coleotteri l'insetto adulto, contrariamente a quanto talvolta si crede, è il minor responsabile dei danni causati al legno. Infatti, questi insetti durante il loro ciclo vitale subiscono una metamorfosi completa, cioè dall'uovo fuoriesce la larva che, dopo un periodo più o meno lungo a seconda della specie, durante il quale essa vive e si accresce all'interno del legno, si trasforma in pupa e successivamente in adulto o insetto perfetto; a questo punto fuoriesce attraverso un foro detto "*foro di sfarfallamento*".
Sono invece le larve che provocano il danno maggiore scavando nell'interno del legno gallerie più o meno lunghe e il cui diametro è in rapporto con le dimensioni della larva, le quali deprezzano il legno sia dal punto di vista estetico che da quello della resistenza meccanica. La base essenziale per il nutrimento delle larve è costituita dalle sostanze di riserva (amidi, zuccheri), dalla cellulosa e dalle sostanze azotate.
Questi insetti sfarfallano generalmente nella primavera-estate e le femmine, dopo la fecondazione, iniziano a deporre le uova nelle fessurazioni che può presentare il legno o in vecchi fori di sfarfallamento; il buono stato di conservazione della superficie lignea con eventuali finiture e la chiusura dei fori di sfarfallamento di attacchi pregressi con appositi stucchi limitano la deposizione delle uova da parte delle femmine delle nuove generazione e quindi il progredire dell'attacco.
Gli insetti si insediano in prevalenza nell'alburno del legno e mentre alcune specie come *Anobium punctatum* e *Stromatium fulvum* possono vivere su un grande numero di legni, sia di Latifoglie che di Conifere, altri sono confinati a un limitato numero di specie; *Hylotrupes bajulus* per esempio si trova solo sui legni di Conifera (pini, abete, douglasia, larice) e *Trichoferus holosericeus* (*Hesperophanes cinereus*) solo su quelli di Latifoglia. Altri attaccano esclusivamente legno che abbia subìto un precedente attacco fungino (*Xestobium rufovillosum*), altri ancora, come i *Lyctus* spp., attaccano solamente latifoglie a vasi grandi (0,07 mm) e con un elevato contenuto di amido (> 3%).
Anche l'età del legno del manufatto ha una notevole importanza: alcune sostanze come vitamine e proteine presenti nel legno con il tempo possono degradarsi, così che le larve non trovano più un nutrimento adeguato per compiere il loro normale ciclo biologico. Alcune larve appartenenti agli Anobidi possiedono nell'apparato digerente, in speciali strutture, dei **simbionti** che forniscono vitamine e producono gli aminoacidi necessari alla vita della larva, per cui queste possono svilupparsi normalmente anche in legni molto vecchi.

I danni causati dagli insetti possono essere molto gravi, perché le larve vivono per lungo tempo (da 2 a 6 anni e anche più a seconda della specie) scavando all'interno del legno gallerie tortuose piene di rosume, che si intersecano fra loro in un fitto intreccio fino a togliere, nei forti attacchi, ogni resistenza meccanica al legno. Purtroppo molto spesso accade che ci si accorga della presenza dell'insetto soltanto quando l'attacco è già avanzato; infatti, nulla appare all'esterno fino al momento in cui le larve si trasformano in insetto perfetto, poiché esse scavano le gallerie nell'interno del legno lasciando intatto un leggero strato superficiale. I primi sintomi dell'attacco si hanno dunque soltanto dopo il primo sfarfallamento degli adulti, quando compaiono i caratteristici fori sulla superficie del legno. Tuttavia, anche allora non si può dare una valutazione esatta dell'entità del danno se non si asporta lo strato superficiale del legno, mettendo così in evidenza il fitto intreccio di gallerie negli strati sottostanti.
Nella Tabella 2.9 sono riassunte per le differenti famiglie di insetti le principali caratteristiche utili per la loro identificazione.

Famiglia insetti	Preferenze del legno	Condizioni ambientali del legno	Forma e dimensioni del foro di sfarfallamento (diametro)	Rosume	Gallerie
Anobidi	C, L Preferibilmente A; talvolta D	secco	Circolare, 1,5-3 mm	polvere fine e pallottoline ellittiche	In tutte le direzioni; fino 3 mm diametro
Cerambicidi	C, L A talvolta D	secco	Da ovali a circolari 3-10 mm	Polvere farinosa e pallottoline	Ovali; fino a 13 mm di diametro
Lictidi	L A (contenuto amido > 3%; larghezza vasi >0,07 mm)	appena stagionato	Circolare - ovale 0,8-2 mm	Polvere simile al talco	Circolari, numerose e in tutte le direzioni, anche parallele alla fibra

Tabella 2.9: Principali famiglie di insetti che causano il degradamento del legno in opera e principali caratteristiche dei legni attaccati. Legenda: C: conifera; L: latifoglia.; A: alburno, D: durame.

Nei legni utilizzati nelle strutture i danni maggiori sono causati dai **Cerambicidi**, insetti che hanno dimensioni tra 1 e 2,5 cm, caratterizzati da lunghe antenne che possono talvolta superare anche la lunghezza dell'insetto

stesso. Tali insetti risultano essere i più pericolosi per le strutture lignee in opera poiché scavano gallerie che possono raggiungere anche un centimetro di diametro ed in direzione variabile rispetto alla fibratura del legno.
Tra questi ***Hylotrupes bajulus***, detto anche **Capricorno delle case**, è il più diffuso; il suo habitat preferenziale è costituito dalle travi in legno di conifera dei sottotetti, la temperatura migliore per il suo sviluppo durante lo stadio larvale è tra 28°C e 30°C.
Le infestazioni riscontrate in vecchi legni sono sempre esaurite, perché la larva di *Hylotrupes*, che non ha simbionti nel suo apparato digerente, dipende interamente per il suo sviluppo dal contenuto in azoto del legno, il cui valore nutrizionale diminuisce dopo poche decadi; attacchi in atto e di notevole entità si riscontrano invece in legni messi in opera in restauri relativamente recenti (max. 80 anni) in cui siano state effettuate massicce sostituzioni.
Meno diffusi, ma ugualmente molto rilevant,i sono i danni dovuti a ***Trichoferus holosericeus***, che infesta esclusivamente legni di Latifoglia quali quercia, pioppo e castagno; l'insetto adulto ha dimensioni di 1 – 2,5 cm, colore bruno uniformemente ricoperto da una peluria grigia, un ciclo biologico di due - tre anni in dipendenza della temperatura e dell'umidità relativa.
Meno comune dei precedenti è lo ***Stromatium fulvum*** che attacca sia il legno di Latifoglia sia quello di Conifera. L'adulto, di dimensioni tra 1,8 e 2,5 cm, è interamente di colore rosso coperto di una corta ed abbondante peluria. Tale insetto vive nel legno molto secco e può causare ingenti danni in quanto il ciclo biologico dura diversi anni e possono susseguirsi sulla stessa struttura diverse generazioni.
Danni decisamente minori per quanto riguarda le strutture lignee, ma molto sensibili per i manufatti raccolti nelle abitazioni, nei musei o nelle chiese sono dovuti alla presenza di **Anobidi**. Questi sono insetti piccoli (2-9 mm), di colore che va dal rossastro al rosso-bruno, attaccano sia il legno di Latifoglia che di Conifera, preferibilmente in opera da un certo numero di anni. Il ciclo biologico varia da due a sei anni, a seconda della specie, delle condizioni climatiche e del tipo di legno.
Tra gli Anobidi, ***Anobium punctatum*** è molto diffuso nei manufatti, anche perché attacca indifferentemente Latifoglie e Conifere; si sviluppa a temperature ottimali di 22-23 °C ed in ambienti con umidità relativa del 50-60%, condizioni ambientali che si trovano facilmente nei musei e nelle chiese. Le larve possiedono simbionti che consentono loro di attaccare anche legni molto vecchi.
Non dissimile da quello dell'*Anobium punctatum* è il comportamento del ***Nicobium hirtum*** e dell'***Oligomerus ptilinoides***, anche se questi ultimi sembrano sopportare temperature superiori, per cui si possono trovare nelle travi dei sottotetti. Attaccano soprattutto le Latifoglie.
Occasionalmente, in manufatti che siano rimasti per lungo tempo in ambienti umidi o esposti all'aperto, si trovano danni - sempre rilevanti - dovuti a ***Xestobium rufovillosum,*** che usualmente infestano le travature dove infiltrazioni di acqua hanno provocato un degradamento fungino.
Attacchi da **Lictidi (*Lyctus brunneus, Lyctus linearis*)**, insetti di piccole dimensioni (3-7 mm), di colore da bruno-rossastro a nero, non si riscontrano mai negli oggetti di legno antico, in quanto le larve non possiedono enzimi atti a digerire la cellulosa e dipendono dalle sostanze di riserva del legno come amidi e zuccheri, che si degradano rapidamente nel tempo. Nella Figura 2.20 è riportata una trave di castagno con un doppio attacco da parte di un cerambicide e da parte di anobidi.

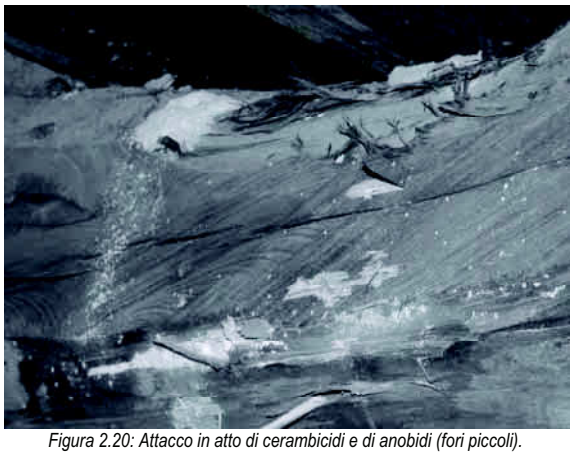


Figura 2.20: Attacco in atto di cerambicidi e di anobidi (fori piccoli).

DEGRADAMENTO DEL LEGNO: ISOTTERI (TERMITI)

Le termiti sono insetti sociali che vivono in colonie molto numerose costituite da tre caste: operaie, soldati e riproduttori; il loro ciclo biologico comprende tre stadi: uovo, ninfa e adulto.

Le operaie sono sterili, attere, di colore biancastro e si occupano di tutte le attività relative al funzionamento della colonia; i soldati sono simili alle operaie, ma hanno il capo e le mandibole più sviluppati e fortemente sclerotizzati, dovendo difendere la colonia dai predatori. I riproduttori sono di dimensioni maggiori, di colore da giallo-bruno a nero e hanno due paia di ali trasparenti di uguale lunghezza; in una comunità vi sono numerosi riproduttori potenziali, ma soltanto una coppia, re e regina, sono normalmente riproduttori attivi. Se uno di essi muore ne subentra immediatamente un altro.
In Italia sono presenti due specie di termiti, *Reticulitermes lucifugus* della famiglia **Rhinotermitidae** (che provoca i maggiori danni al legno in opera) e *Kalotermes flavicollis* della famiglia **Kalotermitidae**.
Le termiti sotterranee (*Reticulitermes lucifugus*) necessitano di un'elevata umidità e di una temperatura moderata e quasi costante, e costruiscono il loro nido nel terreno. Esse scavano così nel sottosuolo numerose gallerie per raggiungere la superficie e le costruzioni, dove trovano le sostanze organiche, soprattutto cellulosiche, di cui si nutrono e cioè legno, carta e tessili. Le termiti digeriscono la cellulosa mediante simbionti presenti nell'apparato digerente. Se fra il nido e la fonte di nutrimento devono superare superfici esposte, esse costruiscono, con terra e frammenti di legno, gallerie (*camminamenti*) che mantengono il contatto con il terreno umido e proteggono le Termiti dalla luce e dall'aria (Figura 2.22).
Questi insetti distruggono il legno scavando gallerie caratteristiche, parallele alla direzione delle fibre e poste nella zona primaticcia dell'anello annuale, che sono prive di rosume ma tappezzate da escrementi e terra. La superficie del legno rimane perfettamente integra, per cui è difficile riconoscere un attacco, che può essere individuato solo con l'asportazione dello strato superficiale del legno o con l'osservazione delle eventuali gallerie superficiali presenti nelle zone vicine al legno infestato.
Le *Kalotermes flavicollis* sono note anche come "termiti del legno secco", vivono in una colonia che non raggiunge mai grandi proporzioni e possono fare il nido anche all'interno del legno. Attaccano il legno scavando gallerie nel legno primaticcio, le gallerie sono prive di rosume il quale si deposita per gravità nella parte più bassa della galleria. Infatti spesso l'indizio dell'attacco è dovuto alla presenza del materiale espulso che si accumula sulle superfici sottostanti il legno attaccato (Figura 2.21).

Figura 2.21: attacco di termiti su trave di castagno.

Figura 2.22: galleria di collegamento su di un muro realizzata dalle termiti per raggiungere le parti di legno senza esporsi alla luce.

DEGRADAMENTO DEL LEGNO: FUNGHI XILOFAGI

I funghi responsabili dei maggiori danni al legno in opera appartengono prevalentemente al gruppo dei **basidiomiceti**, il cui ciclo biologico può essere così schematizzato: le spore, diffuse attraverso l'aria, venendo a contatto con legname avente un contenuto di umidità superiore al 20%, germinano dando origine alle ife, i filamenti che costituiscono il micelio fungino. Queste invadono dapprima le cellule parenchimatiche dei raggi, quindi le cellule legnose; in alcune specie (*Serpula lacrymans*) il micelio può organizzarsi in cordoni detti rizomorfe che hanno varie funzioni: la conduzione dell'acqua, la diffusione dell'attacco in punti anche lontani e il mantenimento delle ife in vita latente quando le condizioni ambientali non sono più compatibili con la crescita del micelio. A questa fase di sviluppo prettamente vegetativo succede la formazione del corpo fruttifero che dà luogo alle spore.
Sul piano fisiologico il carattere fondamentale dei funghi è dato dal fatto che la loro nutrizione dipende essenzialmente dalla loro capacità di digerire sostanze organiche complesse: gli enzimi secreti dalle ife trasformano composti insolubili e molto complessi, come la cellulosa, in prodotti solubili e meno complessi che le cellule del fungo possono assorbire attraverso le loro pareti. Questo degradamento è designato con il nome di **carie**: a seconda del modo in cui si realizza e della natura dei costituenti degradati, la carie del legno provocata dai basidiomiceti può presentarsi sotto forme differenti.
Si individuano due tipi principali di carie, la **carie bruna** e la **carie bianca**. La distinzione è basata sull'apparenza del legno attaccato ed è connessa a variazioni nella composizione chimica della parete cellulare indotte dall'azione degli enzimi, i quali nella carie bruna sono in grado di degradare la cellulosa, le emicellulose ed in

caso di attacco molto avanzato della parete cellulare restano solo la lignina e piccole quantità di idrati di carbonio, il legno diviene di colore più scuro e presenta fessurazioni trasversali e longitudinali che formano dei parallelepipedi e ricordano l'aspetto del legno carbonizzato, si parla in questo caso di **carie cubica**. Il legno molto alterato diviene friabile dando una polvere bruna sottile.
Nella carie bianca le ife secernono enzimi che degradano sia la lignina che la cellulosa e le emicellulose; la lignina nei primi stadi di attacco e la cellulosa successivamente, oppure tutte e due simultaneamente. Il legno conserva la sua struttura fibrosa e il suo aspetto generale è modificato da un cambiamento del colore originario in un bianco-giallastro; la sua consistenza diviene molle e il legno si rompe facilmente senza però essere friabile.
Le **proprietà meccaniche** del legno sono notevolmente modificate dall'attacco fungino, specie la resistenza ad urto che è una delle prime caratteristiche del legno a subire una riduzione. Ad esempio un attacco iniziale da funghi da carie bruna su legno di Conifere, che si traduce in piccole modificazioni di colore e di aspetto del legno, comporta una perdita di resistenza ad urto del 60%; lo stesso dicasi per la resistenza a flessione statica.
L'**umidità** iniziale del legno è uno dei fattori più importanti perché un attacco da funghi si possa instaurare con successo: essa deve essere superiore al 20%. Quando poi l'attacco si è affermato, è il fungo stesso con il suo metabolismo che contribuisce a mantenere nel substrato il tenore di acqua sufficiente al suo sviluppo.
La **temperatura** di accrescimento del micelio varia entro limiti abbastanza ampi, in generale tra 10 e 40 °C con un intervallo ottimale tra 20 e 30 °C.
La **luce** non è indispensabile alla crescita del fungo se si fa eccezione al momento della formazione del corpo fruttifero: infatti in luoghi privi di luce, come miniere e cantine, i funghi presentano spesso forme anomale.
Se le condizioni di temperatura ambiente e di umidità del legno rimangono ottimali l'attacco fungino può proseguire senza interruzioni e si possono avere danni notevoli in poco tempo; solitamente quando la temperatura ambiente diminuisce al di sotto dei 10°C l'attacco si arresta anche se le ife rimangono vive, capaci di riprendere le loro attività non appena le condizioni ambientali saranno ritornate favorevoli.
Il danno dovuto a funghi da carie si riscontra solitamente in travi di sottotetti dove infiltrazioni di acqua hanno portato il legno ad un'umidità ottimale, più raramente in manufatti immagazzinati in ambienti umidi.
Esempi di attacchi fungini su strutture sono riportati nelle Figura 2.23 e Figura 2.24.
Nella Figura 2.23 è esemplificato il tipico attacco da carie che si osserva nelle strutture dei sottotetti: l'attacco si sviluppa alla testata della trave inserita nella muratura e dove generalmente si verificano infiltrazioni di acqua dall'esterno.

Figura 2.23: Esempio tipico di attacco fungino su trave: l'infestazione si è sviluppata nella zona di inserzione della trave lignea nella muratura.

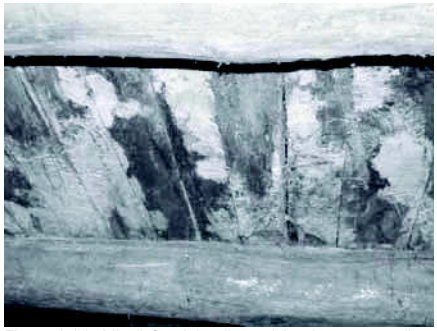


Figura 2.24: Miceli fungini sviluppatisi sul sottotetto di un edificio.

Il fungo causa di maggiori danni in Europa è la *Serpula lacrymans* per le sue possibilità di adattamento molto particolari e per l'intensità e l'estensione degli attacchi che provoca. Questo fungo si sviluppa su legno con un'umidità del 20%, a temperature variabili tra 3 e 26°C (con range ottimale tra 21 e 23°C), quindi può continuare ad accrescersi anche nel periodo invernale.
Altri funghi della carie che si riscontrano nelle strutture lignee degli edifici possono essere carie bianche (*Bjerkandera*, *Collybia, Paxillus, Pleurotus, Trametes, Phellinus*) su legno di latifoglie e più spesso carie bruna (*Coniophora puteana, Antrodia spp, Gloeophyllum spp, Poria spp)* su legno di latifoglie e principalmente su legno di conifere.

Altri esempi di attacchi fungini su legno strutturale possono essere dovuti a **carie soffice** in condizioni di umidità molto elevate e scarsa ossigenazione tali da impedire lo sviluppo dei funghi basidiomiceti. Altri fattori quali le alte temperature, elevata concentrazione di preservanti contro i basidiomiceti possono favorire talvolta lo sviluppo di questi funghi appartenenti a Deuteromiceti ed Ascomiceti.
Il progredire del degradamento da parte di questi funghi è molto lento rispetto ai basidiomiceti ed avviene principalmente sulla cellulosa della parete secondaria delle cellule legnose. L'attacco determina un aspetto del legno molto scuro, una consistenza del legno molto soffice quando è bagnato e una volta secco si evidenziano

crettature longitudinali e trasversali presenti solo su un sottile strato superficiale, infatti immediatamente sotto tale strato il legno risulta sano (Figura 2.25).

Figura 2.25: Attacco da carie soffice su travetti di castagno.

Vi sono poi funghi detti **"cromogeni"**, o "dell'azzurramento"; con quest'ultimo termine viene designata una particolare colorazione grigia-azzurrastra più o meno intensa che il legno assume in seguito all'attacco fungino. E' un fenomeno molto comune nelle Conifere ma si osserva anche nelle Latifoglie, specie di origine tropicale; è limitato alla zona dell'alburno in quanto questi funghi vivono a spese di contenuti cellulari delle cellule parenchimatiche ricche di sostanze di riserva facilmente degradabili. Proprio per questo il principale danno causato al legno dall'azzurramento è di ordine estetico, mentre le proprietà meccaniche non vengono alterate in modo apprezzabile.
I funghi responsabili dell'azzurramento sono numerosi e appartengono ad Ascomiceti e Deuteromiceti; il loro sviluppo è condizionato da un'umidità del legno superiore al 30%, che corrisponde al punto di saturazione delle pareti cellulari, e dalla presenza di ossigeno; la temperatura ottimale è situata fra i 22 e i 25 °C, ma questi funghi resistono molto bene al freddo.
L'infestazione avviene principalmente sui tronchi appena abbattuti o sui segati non stagionati, in secondo luogo su manufatti che in determinate situazioni abbiano assunto un'elevata umidità. In ogni caso la caratteristica colorazione che il legno assume non è dovuta ad alcuna sostanza colorante diffusa dalle ife del fungo, ma ad un fenomeno di diffrazione della luce sulle ife scure attraverso le pareti traslucide delle cellule del legno.
In ambienti molto umidi, dove vi possano essere fenomeni di condensa, viene spesso notata la presenza sui manufatti di "muffe", cioè di funghi appartenenti ai Deuteromiceti (*Penicillium, Aspergillus*); anche questi funghi non causano gravi danni al legno, ma possono alterare vernici e colori.

PRESERVANTI DEL LEGNO

I preservanti del legno possono essere distinti in:

- **Trattamenti preventivi** se applicati sul legno sano prima della sua utilizzazione per evitare che esso sia attaccato da organismi xilofagi; per esempio, impedendo agli insetti di deporre le uova sulla superficie e negli interstizi del legno trattato e alle spore fungine, che sono sempre presenti nell'aria, di svilupparsi venendo a contatto con il legno.
- **Trattamenti curativi** devono invece distruggere gli organismi xilofagi già presenti all'interno del legno, come uova, larve, insetti e micelio fungino, impedendo il progredire del danno nel legno attaccato e il diffondersi dell'infestazione al materiale sano. Tra i trattamenti curativi citiamo l'applicazione di formulazioni in solvente organico contenente un fungicida e o un insetticida (mezzi chimici); le atmosfere modificate e controllate, il calore e le microonde (mezzi fisici).

Trattamenti con mezzi chimici quando si utilizzano sostanze chimiche biocide applicate con diverse metodologie di applicazione. Possono essere preventivi o curativi e determinano un'azione protettiva la cui durata nel tempo dipende dal tipo di sostanza impiegata dalle modalità di applicazione e dalla condizione di servizio del manufatto trattato**.**
I trattamenti con mezzi chimici possono essere classificati come:

- *Prodotti oleosi (creosoto ed oli di creosoto).* Tra questi il capostipite è il creosoto che rappresenta il primo preservante a essere stato utilizzato mediante impregnazione in autoclave (*procedimento Bethell 1838*) per paleria e traverse ferroviarie. L'uso del creosoto ha adesso delle restrizioni d'uso in ambito europeo ed è proibito per legni destinati ad arredo urbano, edifici civili, giochi per giardini, imballaggi.
- *Prodotti in soluzione acquosa.* Tra questi citiamo i *CCA* (soluzione a base di rame, arsenico e cromo) che ha delle restrizioni per il suo utilizzo (è permesso per pali per telecomunicazioni ed

elettricità, traverse ferroviarie, barriere autostradali, protezione antivalanghe, ecc.) in base alla Direttiva europea 2003/2/CE del 6/01/2003 che vieta l'utilizzo di prodotti contenenti arsenico. In Europa il CCA è stato sostituito da altri composti ternari in cui l'arsenico e il cromo sono stati sostituiti con prodotti meno tossici: *CCB* (sali di cromo, rame, boro), *CCF* (sali di cromo, rame, fluoro), *CCP* (sali di cromo, rame, fosforo), *CXS* (composti in cui il cromo e l'arsenico sono sostituiti da un complesso organico del rame). Altri prodotti in soluzione acquosa sono composti a base di *acido borico* (H_3BO_3) e *borace* ($Na_2B_4O_7$ *10* H_2O). Questi sono attivi contro i funghi e gli insetti ma, essendo facilmente dilavabili, il loro utilizzo è indicato per manufatti lignei in ambienti interni. Altri fungicidi ad ampio spettro sono i *sali ammonici quaternari (ACQ*) e le *ammine terziarie*.

Attualmente per la preservazione del legno non a contatto con il terreno sono largamente utilizzati prodotti contenenti *composti azolici* (*propiconazolo, azaconazolo, tebuconazolo*) e *sali di rame* (II); *carbammati* (*IPBC*). Tra questi alcuni sono molto versatili in quanto possono essere utilizzati sia in fase organica che in fase acquosa. Alla formulazione di questi composti possono essere aggiunte molecole con attività fungicide quali derivati sintetici del piretro (*permetrina, cipermetrina, deltametrina*) e composti organofosforici (*chlorpyrofos*).

Trattamenti con mezzi fisici (per es. calore, microonde, atmosfere modificate e controllate, radiazioni ionizzanti, ecc) possono essere preventivi o curativi ma non hanno alcun effetto duraturo nel tempo in quando il legno dopo il trattamento può subire un successivo attacco da parte di organismi xilofagi.

Trattamenti senza l'utilizzo di biocidi. Negli ultimi anni sono state sviluppate nuove tipologie di trattamenti senza ricorrere all'utilizzo di biocidi e dove il legno subisce una modificazione strutturale irreversibile che lo rende meno suscettibile all'attacco da parte dei biodeteriogeni. Lo sviluppo di questi trattamenti è dovuto alla necessità, imposta dalle recenti restrizioni della legislazione europea che ha spinto a ricorrere a sostanze meno tossiche per l'uomo e più ecocompatibili. Tra questi trattamenti citiamo *il trattamento termico*, i *trattamenti oleotermici* e la *modificazione chimica del legno*.

- Nel *trattamento termico* il legno subisce una modificazione dei componenti della parete cellulare per mezzo della temperatura elevata e del vapore che determinano una cambiamento del colore, una stabilizzazione delle variazioni dimensionali ed un incremento della durabilità naturale, per contro si ha una riduzione della resistenza a flessione. Possiamo affermare che il legno che ha subito un processo termico è un materiale nuovo con caratteristiche diverse dal legno di partenza. Tra i processi commerciali esistenti citiamo il finlandese *Thermowood,* il francese *New Option wood* e l'olandese *Plato process*.
- I *trattamenti oleotermici* si basano sull'applicazione a caldo di oli di origine naturale e determinano una riduzione delle caratteristiche igroscopiche con la conseguente riduzione delle variazioni dimensionali e della suscettibilità da parte degli organismi xilofagi principalmente i funghi della carie.
- La *modificazione chimica* del legno implica una reazione chimica tra i gruppi reattivi della parete cellulare e un reagente: in letteratura esistono numerosi esempi ma i processi già presenti sul mercato o in procinto di arrivarci sono l'acetilazione (legno Accoya ®) e la furfurilazione.

Le prestazioni minime che un trattamento preservante deve avere nelle differenti classi di utilizzo sono indicate nella norma UNI EN 599-1 in termini di:

Efficacia del prodotto nei confronti dei differenti organismi xilofagi. L'efficacia è definita dal valore critico espresso in kg/m^3 o in g/m^2 e rappresenta la quantità minima di preservante efficace in una determinata classe di utilizzo.

Ritenzione: quantità di sostanza assorbita dal legno ed espressa in kg/m^3 o in g/m^2 e dalla profondità di penetrazione. L'assorbimento e la penetrazione dipendono dalla specie legnosa dal tipo di preservante e dai metodi di applicazione (a pressione o senza pressione). La trattabilità o impregnabilità delle specie legnose maggiormente impiegate in edilizia è riportata nella Tabella 2.7.
Secondo la UNI EN 599-2 il produttore deve fornire almeno le seguenti informazioni:

- nome del prodotto e riferimento alla UNI EN 599 classe di utilizzo da 1 a 5;
- procedura di applicazione (s superficiale, p impregnazione sp entrambe);
- tipo di legno (conifera , latifoglia, entrambi);
- se è utilizzata una finitura o no;
- il valore critico in g/m^2 o kg/m^3;
- dosaggio di applicazione raccomandato.

Le classi di penetrazione del preservante sono indicate nella UNI EN 351/1 e riassunte nella Tabella 2.10. Questa normativa la cui ultima revisione è stata pubblicata nel 2008 stabilisce per ogni classe di utilizzo le classi di penetrazione anche in funzione delle caratteristiche di impugnabilità del legno. Le indicazioni mostrate nella tabella cinque si basano sull'interpretazione personale dell'autore sulla base di quanto scritto nella norma e

devono essere prese come indicazione di massima ed inoltre sono importanti per una comprensione della norma in questo periodo in cui ci troviamo di frontre a norme appena revisionate e norma ancora nella versione precedente e quindi con differente terminologia, tutto questo porta ad una scarsa comprensibilità da parte di chi le legge.

E' importante sottolineare che in alcuni paesi europei sono state emesse delle leggi nazionali che si basano sulla norma UNI EN 351/1 ma che esplicano in maniera chiara ed univoca come il legno deve essere protetto nelle differenti classi di utilizzo.

La zona analitica rappresenta la zona di analisi per verificare se un preservante rispetta i requisiti di penetrazione.

Classe di utilizzo	Specie legnosa	Classe di penetrazione	Requisito di penetrazione
1	tutte	NP1	nessuno
2	tutte	NP1	nessuno
3 (3.1 - 3.2)	resistente	NP2	3 mm di alburno nelle facce laterali
	permeabile	NP3	6 mm di alburno nelle facce laterali
4 (4.1 – 4.2)	resistente	NP3	3 mm di alburno nelle facce laterali
	permeabile	NP4 (legno tondo)	25 mm di alburno
		NP5	tutto l'alburno *
5	permeabile	NP6	tutto l'alburno e almeno 6 mm di durame

Tabella 2.10: Classi di penetrazione del preservante per le diverse classi di utilizzo. Si definisce permeabile il legno appartenente alla classe di impregnabilità 1, resistente quello appartenente alle altre classi.

I **trattamenti a pressione** assicurano una buona penetrazione del preservante nel legno. Vengono eseguiti in autoclave, con parametri che variano a seconda della specie legnosa, delle dimensioni del legno e della natura del preservante. Questi trattamenti sono applicati al legno che sarà messo in opera nel terreno o comunque dove il rischio di attacco biologico è molto elevato (classi di impiego 3.2, 4 e 5).

I **trattamenti senza pressione** comprendono:

- trattamento ad immersione, con durata che può variare da alcuni minuti a diverse giorni. Questo trattamento viene applicato generalmente ai semilavorati pronti all'impiego e può essere facilmente eseguito anche a piè d'opera in cantiere;
- trattamento a spruzzo, che viene effettuato con appositi vaporizzatori o pistole "airless", sia a piè d'opera che in opera;
- trattamento a pennello, che viene normalmente applicato su materiale già messo in opera;
- fumigazioni: vengono normalmente eseguite solo a scopo curativo, in caso di attacco da insetti, da parte di operatori specializzati.

Nella Figura 2.26 è riportato il procedimento decisionale che un progettista di strutture in legno deve affrontare prima della messa in opera di una struttura lignea.

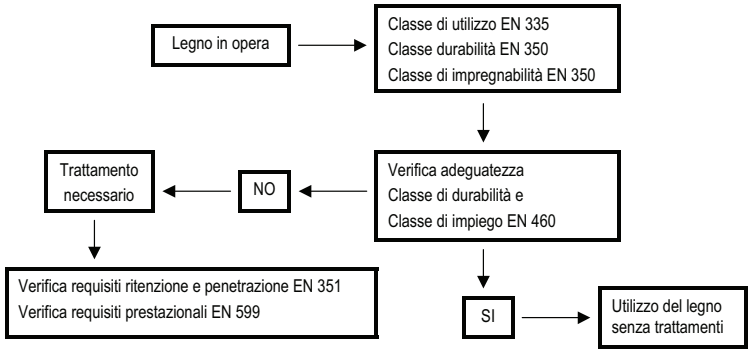


Figura 2.26: Procedimento decisionale per la corretta scelta del materiale ligneo in funzione della durabilità.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] UNI EN 335-1 – "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Definizione delle classi di utilizzo - Parte 1: Generalità".
[2] UNI EN 335-2 – "Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Definizione delle classi di utilizzo - Parte 2: Applicazione al legno massiccio".
[3] UNI EN 350- 1 – "Durabilità naturale del legno massiccio. Guida ai principi di prova e classificazione della durabilità naturale del legno."
[4] UNI EN 350-2: - "Durabilità naturale del legno massiccio. Guida alla durabilità naturale e trattabilità di specie legnose scelte di importazione in Europa."
[5] UNI EN 351-1: - "Legno massiccio trattato con i preservanti – Classificazione di penetrazione e ritenzione del preservante."
[6] UNI EN 460: - "Durabilità naturale del legno massiccio. Guida ai requisiti di durabilità per legno da utilizzare nelle classi di rischio."
[7] UNI EN 599-1 – "Prestazioni dei preservanti del legno, utilizzati a scopo preventivo, determinate mediante prove biologiche. Specifiche secondo le classi di rischio."
[8] UNI EN 599-2 – "Prestazioni dei preservanti del legno, utilizzati a scopo preventivo, determinate mediante prove biologiche. Classificazione ed etichettatura. "
[9] Chiappini E., Liotta G., Reguzzi M.C., Battisti A. (2001), *Insetti e Restauro Legno carta tessuti e altri materiali,* Calderini Edagricole, Bologna.
[10] R.A. Eaton M.D.C (1993), *Hale Wood Decay Pest and Protection,* Chapman & Hall, London.

2.6 DEGRADAMENTO DA AGENTI NON BIOLOGICI

Per degradamento abiotico s'intende il degradamento dovuto a cause di origine non biologica tra cui gli agenti atmosferici, i fattori chimici, i fattori fisici e a cause di natura statica del legno utilizzato nella costruzione di edifici (degradamento strutturale). In questo paragrafo saranno trattati i fattori atmosferici che determinano il degradamento abiotico in quanto responsabili di modificazioni superficiali e del legno e del colore che rivestono importanza sia dal punto di vista estetico che come fenomeni precursori del degradamento biotico.

FATTORI ATMOSFERICI DEL DEGRADAMENTO ABIOTICO

Quando il legno è esposto all'esterno, non a contatto con il terreno, si osserva un degradamento dovuto a una complessa combinazione di fattori di tipo chimico, fisico e meccanico che è definito in inglese ***weatherin***; un termine equivalente in italiano non esiste e può essere tradotto con *degradamento dovuto a fattori atmosferici*.
I fattori che causano questo tipo di alterazione sono in ordine d'importanza l'umidità, la luce solare, variazioni di temperatura, le aggressioni da parte di sostanze chimiche (dovute all'inquinamento atmosferico), l' abrasione da particolato trasportato dal vento e l'azione concomitante di agenti biologici quali muffe e funghi cromogeni (agenti che non causano una diminuzione delle caratteristiche meccaniche del legno ma che determinano modificazioni superficiali di colorazione del legno, (vedere paragrafo 2.5).
Rapide variazioni di umidità che si hanno sulla superficie del legno esposto all'esterno a causa di pioggia, rugiada, assorbimento di vapore acqueo, determinano continui ritiri e rigonfiamenti in funzione del gradiente di umidità tra esterno e interno del legno con conseguente formazione di deformazioni e rotture superficiali; le variazioni dimensionali si sviluppano in maniera diversa nel legno tardivo e in quello primaticcio e determinano come effetto finale la rimozione dello strato superficiale del legno primaticcio a densità minore.
La luce solare determina un rapido foto invecchiamento della superficie esposta con una variazione del colore che può, a seconda delle specie legnose, tendere ad un ingiallimento o un imbrunimento e successivamente all'ingrigimento. Queste variazioni di colore sono dovute ad una decomposizione della lignina delle cellule legnose più superficiali (ad una profondità compresa tra 0,05 e 0,5 mm) innescata dalla radiazione UV ed ad una ossidazione degli estrattivi. La radiazione UV ha un'energia sufficiente per degradare la lignina e i carboidrati, componenti strutturali della cellula legnosa, mentre per l'ossidazione e decomposizione degli estrattivi è sufficiente l'energia della radiazione del visibile. Inoltre l'acqua meteorica determina il dilavamento degli estrattivi idrosolubili dalla superficie del legno.
I due fattori di weathering, luce solare e umidità, agiscono a differenti momenti e spesso il fenomeno di degradamento è dovuto alla somma dei due fattori dove l'uno può incrementare l'effetto dell'altro: il legno è irradiato dalla luce solare dopo essere stato esposto alla pioggia o all'umidità della notte.
Il processo di *weathering* inizia immediatamente quando il legno è esposto all'esterno ma è un processo molto lento, infatti si ha una erosione superficiale di 5-6 mm di spessore in 100 anni di esposizione alle intemperie. Nonostante la lentezza di questo processo è importante conoscerne i fattori che lo determinano e adottare misure preventive poiché le variazioni chimico fisiche che produce potrebbero facilitare e favorire lo sviluppo del degradamento biotico a tutta la struttura del legno e diminuire la sua durata in servizio in modo considerevole.
Altro fattore che può influenzare il fenomeno è la temperatura: alte temperature possono aumentare la velocità di reazione della decomposizione della lignina, invece le basse temperature possono, con la trasformazione dell'acqua assorbita dal legno in ghiaccio, incrementare la formazione delle fessurazioni superficiali. Altri fattori come l'erosione e l'abrasione superficiale dovute a vento e sabbia o particolato possono incrementare la rimozione degli strati superficiali del legno.
I prodotti utilizzati per limitare l'invecchiamento dovuto agli agenti atmosferici sono elencati di seguito e per ogni tipologia sono riassunte le principali caratteristiche.

- **Prodotti filmanti (vernici e pitture)**
  - *Vernici:* prodotti che formano un film (continuo o discontinuo) trasparente o leggermente opaco sulla superficie del legno. Può essere prevista una leggera colorazione.
  - *Pitture:* prodotti che formano un film opaco, non trasparente.
- **Prodotti non filmanti (impregnanti superficiali):** prodotti che non formano un film continuo e permettono un continuo scambio di umidità con l'ambiente; all'applicazione dell'impregnante segue una finitura e può essere previsto un fondo o un intermedio. Inoltre gli impregnanti possono essere utilizzati come unico trattamento a più mani. Nella preparazione di questi prodotti vi è presente un pigmento inorganico per schermare la radiazione solare ed anche un prodotto biocida in grado di bloccare l'attacco da parte di muffe, funghi cromogeni e funghi basidiomiceti negli strati superficiali del legno.
- **Finiture per esterni**: sono prodotti da utilizzarsi come ultima mano di un ciclo di verniciatura e devono avere maggiori caratteristiche di elasticità rispetto alle mani precedenti per evitare rotture dovute alle variazioni dimensionali.

Nelle finiture possono essere presenti degli additivi quali *assorbitori di radiazioni UV, pigmenti inorganici* e *captatori di radicali*.

- Gli *assorbitori di radiazioni UV* svolgono un'azione di filtro sulle radiazioni ad alta energia (UV) che possono degradare la lignina nel caso di prodotti trasparenti o il film se è stato aggiunto un pigmento. Dal punto di vista chimico sono composti (derivati del benzofenone, del benzotriazolo e della feniltriazina) che assorbono la radiazione compresa tra 280 e 350 nm trasformandola in calore. Tra gli assorbitori di radiazioni UV vi sono anche i *pigmenti inorganici* (ossidi di ferro, biossidi di titanio);
- I *captatori di radicali* (HALS, ammine stericamente impedite) servono per bloccare le specie radicali che formatesi per effetto della luce solare potrebbero dare effetti degradativi sul film. Questi composti si legano alle specie radicali che formando dei composti stabili.

Le caratteristiche prestazionali di un trattamento verniciante per esterno sono determinabili mediante procedimenti standardizzati a livello europeo di seguito elencati:

- Valutazione della permeabilità all'acqua (UNI EN 927-5);
- Resistenza alla radiazione solare mediante invecchiamento naturale (UNI EN 927-3), cioè esposizione all'esterno o mediante invecchiamento artificiale (UNI EN 927-6).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Sam R., *Weathering of Wood - Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites,* (Hardcover), Roger M. Rowell, CRC.
[2] Bulianin F., *Verniciare il legno*, CATAS, Udine.
[3] UNI EN 927-3 - "Pitture e vernici - Prodotti e cicli di verniciatura per legno per impieghi esterni - Parte 3: Prova d'invecchiamento naturale".
[4] UNI EN 927-5 - "Pitture e vernici - Prodotti e cicli di verniciatura per legno per impieghi esterni - Parte 5: Determinazione della permeabilità all'acqua liquida".
[5] UNI EN 927-6 – "Pitture e vernici - Prodotti e cicli di verniciatura per legno per impieghi esterni - Parte 6: Esposizione di rivestimenti per legno all'invecchiamento artificiale utilizzando lampade fluorescenti e acqua".

Capitolo 3

Legno e materiali a base di legno

3.1 LEGNO MASSICCIO, ELEMENTI INCOLLATI A SEZIONE INTERA, ELEMENTI A 2-3 LAMELLE

Con l'evoluzione delle tecniche di lavorazione ed assemblaggio, le tipologie di elementi strutturali in legno sono divenute sempre più numerose. Fra queste, il legno massiccio tal quale, ovvero quello ottenuto solamente dalla segagione del tronco, rappresenta la tipologia con maggiore tradizione in edilizia ed attualmente è utilizzato principalmente per interevenți di recupero e/o sostituzione di strutture esistenti.
I prodotti in legno massiccio vengono ricavati dai tronchi migliori per forma, dimensioni, caratteristiche di accrescimento. L'esperienza dei selvicoltori, dei boscaioli e dei segantini, integrata dalle moderne tecniche di misurazione e monitoraggio della qualità del legno, consentono di eseguire una selezione accurata, per ottimizzare l'impiego di ogni tronco in funzione delle sue caratteristiche intrinseche. Ad esempio solo dai tronchi idonei vengono prodotte le travi squadrate od asciate di grandi dimensioni, così come gli elementi con tolleranza di smusso e conicità (dette commercialmente "Uso Fiume" o "Uso Trieste"). I tronchi con caratteristiche dimensionali e qualitative intermedie sono la base per la produzione di segati a sezione quadrata di dimensioni intermedie (morali, moraletti) e di tavole di buona qualità (fuori cuore e/o radiali). Infine, dai tronchi di forma e dimensioni meno favorevoli si ricavano le tavole di minore dimensione, ma di qualità meccanica comunque elevata, che vengono selezionate per la produzione di elementi incollati previa la bonifica dei difetti più importanti (legno lamellare). Da ogni tipologia di tronco è possibile comunque ricavare vari elementi, di dimensioni e qualità diverse, che l'esperienza del progettista e del carpentiere consente di impiegare in maniera ottimale nelle varie parti dell'edificio, contenendo i costi.
Il vantaggio di un elemento in legno massiccio è che la sua struttura, rispetto alla materia prima "tronco" da cui è ricavato, ha subito poche modifiche. In particolare: segagione e stagionatura naturale, essiccazione ed eventualmente incollaggio.
La piallatura viene normalmente eseguita, prima o dopo l'essiccazione, come complemento per ottenere la finitura superficiale desiderata.
Le tipologie più frequentemente utilizzate, nel caso del legno massiccio di Conifere, sono riportate in Tabella 3.1.

Tipo	Spessore d e/o altezza h	Larghezza b
listello	$d \leq 40$mm	b <80mm
tavola	$d \leq 40$mm	$b \geq 80$ mm
tavolone	d>40mm	b >3d
trave	$b \leq h \leq 3b$	b >40 mm

Tabella 3.1: Dimensioni standard dei segati di conifera.

La lunghezza standard per listelli, tavole e tavoloni è generalmente di 4 m, in casi eccezionali si trovano sul mercato anche assortimenti che vanno da 3 m a 6 m. Il legname squadrato viene offerto alla clientela secondo le richieste, con incrementi in lunghezza di 1 m. La lunghezza massima dipende però dalla sezione e dalle possibilità di trasporto e non va normalmente oltre i 14 m. Per quanto concerne le dimensioni delle sezioni, sono usuali incrementi di 20 mm. La sezione standard generalmente è di 260 mm; la sezione massima, limitata dal diametro del tronco di partenza, è di circa 400 mm. Rispetto alle dimensioni di segagione, a causa della stagionatura del legname, è necessario calcolare una riduzione della sezione dello 0,24% per ogni punto percentuale di variazione di umidità rispetto al punto di saturazione delle fibre (circa 30%).
Il legno massiccio per uso strutturale deve essere classificato secondo la resistenza con una regola conforme alla norma armonizzata UNI EN 14081. Per il legname di provenienza italiana può essere applicata la norma UNI 11035. Più in generale, per la classificazione del legname massiccio di conifere dell'Europa Centro-Sud può essere applicata la norma DIN 4074; in ogni caso molti paesi Europei e non, hanno pubblicato norme nazionali per la classificazione del legname cresciuto all'interno del proprio territorio.
Come descritto in dettaglio al paragrafo 3.6, il legname deve essere classificato da parte di un produttore qualificato (ai sensi del D.M. 14-01-2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni") possibilmente dopo la stagionatura; se viene rilavorato successivamente alla classificazione (superando i limiti di 5 mm per sezioni

minori o uguali ai 100 mm e 10 mm per sezioni superiori ai 100 mm) deve essere riclassificato. A partire dal settembre 2009, salvo ulteriori rinvii della scadenza, al legno massiccio per usi strutturali dovrà essere obbligatoriamente applicato il marchio CE.
Tra le specie legnose attualmente utilizzate in Italia predomina sicuramente l'abete (prevalentemente abete rosso), in minor quantità vengono utilizzati i larici (europeo e siberiano) e tra le latifoglie il castagno e la quercia; eccezionalmente si riscontra l'impiego di legname di pino (per esempio in strutture della zona costiera della Toscana si trovano travature di pino marittimo, mentre al sud potrebbe essere utilizzato il pino laricio). Un ottimo materiale per uso strutturale è rappresentato dalla douglasia, specie arborea presente in piantagioni situate sull'Appennino Tosco – Emiliano, il cui legname è caratterizzato da durabilità naturale e valori di resistenza superiori a quelli dell'abete (a parità di qualità strutturale).
Per le specie legnose di più frequente impiego in ambito strutturale di seguito è riportata una sintesi delle principali caratteristiche. Per i profili resistenti associabili si vedano le tabelle riportate nel paragrafo 2.4.

ABETE BIANCO (*Abies alba)*	E: Silver Fir; D: Tanne; F: Sapin
CARATTERISTICHE. Durame e alburno non differenziati, colore biancastro o giallognolo opaco, anelli di accrescimento ben distinti, passaggio piuttosto brusco tra la zona primaticcia e la zona tardiva dell'anello, canali resiniferi assenti, tessitura da media a fine. Nodi grossi e duri. Non impregnabile.	
IMPIEGHI: Legno leggero, usato prevalentemente per strutture, falegnameria corrente e imballaggi. Un tempo era preferito per la realizzazione degli alberi da nave, data la regolarità del fusto, le cospicue dimensioni raggiungibili e la favorevole combinazione tra leggerezza, resistenza (a flessione soprattutto) ed elasticità.	

ABETE ROSSO *(Picea abies)*	E: Spruce; D: Fichte; F: Epicea
CARATTERISTICHE. Durame e alburno non differenziati, colore biancastro o giallognolo debolmente lucido soprattutto sulle superfici radiali, anelli di accrescimento ben distinti, transizione graduale tra zona primaticcia e tardiva, canali resiniferi presenti ma poco visibili ad occhio nudo (talvolta la resina si raccoglie in vere e proprie "tasche" inframmezzate al tessuto legnoso), tessitura da fine a media. Non impregnabile	
IMPIEGHI: Legno leggero, usato prevalentemente per strutture, massiccio e lamellare, falegnameria corrente, strumenti musicali ed imballaggi. Viene normalmente preferito all'abete bianco per gli impieghi dove una migliore stabilità dimensionale è necessaria (travi massicce di sezioni elevate, serramenti).	

LARICE *(Larix decidua)*	E: Larch; D: Larche; F: Melèze
CARATTERISTICHE. Alburno di colore biancastro o giallognolo di piccolo spessore, nettamente differenziato dal durame di colore rosso, bruno rossastro o porporino molto ampio, anelli di accrescimento ben distinti con zona tardiva ben marcata, passaggio brusco tra zona primaticcia e tardiva, canali resiniferi presenti e abbastanza ben visibili ad occhio nudo, tessitura fine. Fibratura frequentemente inclinata, con tendenza alle deformazioni più marcata rispetto agli abeti. Durabilità naturale superiore al legno di abete.	
IMPIEGHI: Legno mediamente pesante, usato per strutture (edili, navali e idrauliche) e falegnameria in genere (mobili, pavimenti, rivestimenti, infissi e serramenti). E' particolarmente apprezzato in ragione del suo aspetto estetico, appariscente e gradevole. Per la sua durabilità è impiegato anche per strutture esposte in ambiente umido, oppure all'esterno (coperture) ma non a contatto con il terreno.	

PINO *(Pinus spp.)*	E: Pine; D: Kiefer; F: Pin
CARATTERISTICHE. Largo alburno giallognolo-biancastro nettamente differenziato dal durame roseo o bruno-rossastro chiaro, anelli di accrescimento ben distinti, transizione abbastanza brusca tra zona primaticcia e tardiva, canali resiniferi presenti e ben visibili ad occhio nudo, tessitura media. Nodi grandi, duri. La facilità di impregnazione dell'alburno lo rende adatto per questo trattamento, ove necessario (ad es.per impieghi a contatto col terreno).	
IMPIEGHI: Legno mediamente pesante ma tenero, alburno poco durabile ma facile da impregnare con sali, è assai diffuso in questa forma per gli impieghi in esterni (ad es. arredo urbano). Le provenienze Scandinave sono note per la regolarità di accrescimento e la buona stabilità dimensionale. Usato per strutture, infissi e falegnameria corrente.	

DOUGLASIA *(Pseudotsuga menziesii)*	E: Douglas Fir D: Douglasie; F: Douglas Vert
CARATTERISTICHE. Largo alburno biancastro giallognolo nettamente differenziato dal durame rosa salmone, anelli di accrescimento ben marcati, canali resiniferi presenti, tessitura media- fine. Durame moderatamente durabile (classe 3 EN 350).	
IMPIEGHI: Legno di facile lavorazione, essicca bene con poche deformazioni. Quello importato dall'America settentrionale è ideale per gli infissi, ottimo comunque per usi strutturali sia massiccio che incollato. Utilizzato anche per barriere di sicurezza stradale sottoforma di elementi lamellari.	

CASTAGNO *(Castanea sativa)*	E: Chestnut; D: Kastanie; F: Chataigner
CARATTERISTICHE. Alburno sottile di colore biancastro-giallognolo, ben differenziato dal durame di colore bruno più o meno intenso, talora con variegature più scure; anelli ben distinti, con grossi vasi ben visibili ad occhio nudo e vasi piccoli disposti in linee (fiamme) radiali più o meno oblique; raggi parenchimatici non visibili ad occhio nudo; tessitura grossolana.	
IMPIEGHI: Legno mediamente pesante, durabile, usato per una grande varietà di impieghi, dalla paleria alle strutture (travature), alla falegnameria corrente (mobili rustici, infissi e serramenti, pavimenti) ecc.. A causa dell'elevato contenuto di estrattivi (tannini principalmente) tende a corrodere le parti metalliche con cui viene in contatto e a provocare macchie, specialmente se esposto a condizioni umide. Importato in Italia dalla Francia, Svizzera e dall'Est europeo (Russia soprattutto).	

QUERCE CADUCIFOGLIE (*Quercus* spp.)	E: Oak; D: Eiche; F: Chêne
CARATTERISTICHE. Alburno biancastro differenziato dal durame bruno-giallastro più o meno scuro; anelli di accrescimento ben visibili, raggi ben visibili soprattutto sulle superfici radiali dove appaiono sotto forma di lucide specchiature, tessitura grossolana.	
IMPIEGHI: Legno pesante, ad elevata durabilità (solo il durame); usato da moltissimo tempo per strutture e costruzioni navali, marittime, idrauliche e stradali, traverse ferroviarie, falegnameria in genere e pavimenti, botti. A causa dell'elevato contenuto di tannini, presenta gli stessi inconvenienti del legno di castagno. In Italia importato dalla Francia e dall'Est europeo. Diffusissime anche le querce americane: rossa, analoga al castagno come aspetto ed impieghi; bianca, più ricercata per i serramenti ed i parquet.	

Tabella 3.2: Principali caratteristiche delle specie legnose di maggiore impiego in ambito strutturale.

TRAVI USO TRIESTE E USO FIUME

Tra le tipologie di elementi strutturali di legno massiccio più diffuse in Italia ci sono le travi uso Fiume e uso Trieste. Per questi assortimenti attualmente non è disponibile una regola specifica di classificazione, anche se è previsto di superare questa carenza con la pubblicazione della nuova versione della norma UNI 11035.

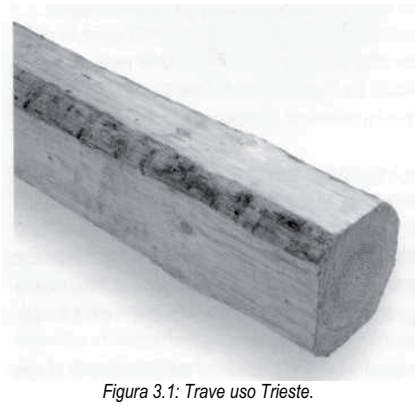


Figura 3.1: Trave uso Trieste.

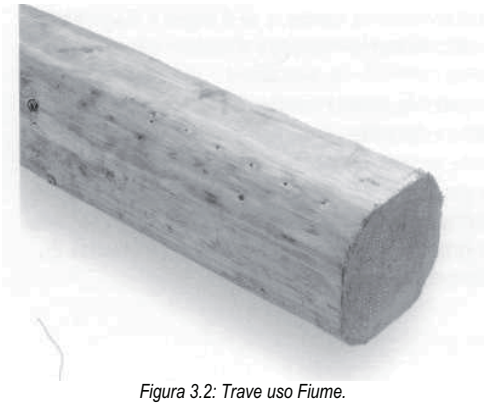


Figura 3.2: Trave uso Fiume.

La travatura uso Trieste per la maggior parte è ricavata da tronchi di abete rosso, ma anche di abete bianco, douglasia, pino ed eventualmente larice, opportunamente e appositamente selezionati.
La lavorazione viene eseguita mediante squadratura meccanica (con frese/pialle), continua dalla base alla punta sui quattro lati seguendo la rastremazione del tronco; la riduzione della sezione (sulla base e sull'altezza) è generalmente inferiore ai 6 mm per ogni metro lineare, con facce contigue ortogonali tra loro e con angoli smussati, grezzi o piallati.
Tale lavorazione intacca solo superficialmente il legno, garantendo così la continuità delle fibre che lo costituiscono. Le travi uso Trieste contengono il midollo e pertanto le fessurazioni da ritiro sono una caratteristica intrinseca a stagionatura avvenuta.
Le travi uso Trieste vengono tradizionalmente utilizzate in carpenteria, per tetti, coperture, impalcature e armature edili. Convenzionalmente la sezione di riferimento è quella del rettangolo/quadrato circoscritto, misurata alla base dell'elemento. Le sezioni disponibili in commercio vanno dal 8x8 cm a 55x55 cm, le lunghezze da 1 m a 14 m. Si ammette una sola curvatura massima pari al 2% di freccia rapportata alla lunghezza.
La travatura Uso Fiume viene per la maggior parte ricavata da tondo di abete rosso, ma anche da tondo di abete bianco, douglasia, pino e a richiesta larice, rovere e castagno, opportunamente scortecciato, sano, diritto e appositamente selezionato.
La lavorazione viene eseguita mediante squadratura meccanica (con frese/pialle), continua e parallela dalla base alla punta dell'elemento su quattro lati (a sezione costante), con facce contigue ortogonali tra loro e con angoli smussati, grezzi o piallati.

Anche le travi uso Fiume contengono il midollo e pertanto le fessurazioni da ritiro sono una caratteristica intrinseca a stagionatura avvenuta.
Gli utilizzi delle travi uso Fiume sono analoghi a quelle uso Trieste, ovvero carpenteria, tetti, coperture, impalcature e armature edili, così come le caratteristiche dimensionali di sezione e lunghezza.

LEGNAME MASSICCIO DA COSTRUZIONE GIUNTATO O KVH (KONSTRUKTIONSVOLLHOLZ)

Si tratta di legno massiccio squadrato e piallato, giuntato a pettine sull'intera sezione trasversale (conformemente alla UNI EN 385). Normalmente il *KVH* viene prodotto in Abete rosso; altre specie come il Pino, l'Abete bianco e il Larice possono essere utilizzate.
A differenza del legno massiccio tradizionale, che è disponibile nelle più svariate dimensioni a seconda dei diametri possibili del tondame, il *KVH* viene venduto in misure standard. Le lunghezze disponibili dipendono normalmente dalla sezione trasversale e possono essere intere o giuntate a pettine. La trave *KVH* giuntata viene fornita in lunghezze sino a 14 m. Come collante si usano resine poliuretaniche trasparenti, adatte all'impiego in esterni. Ammesse ma raramente impiegate, sono le colle a base di resine resorciniche.
Per i prodotti giuntati a pettine è necessaria la prova di idoneità dell'adesivo per le strutture portanti. L'umidità del *KVH* incollato è dell'ordine del 12-15%. L'impiego del *KVH* è identico a quello del legno massiccio non giuntato. In particolare, la possibilità di fessurazioni superficiali è molto ridotta, ma non esclusa.

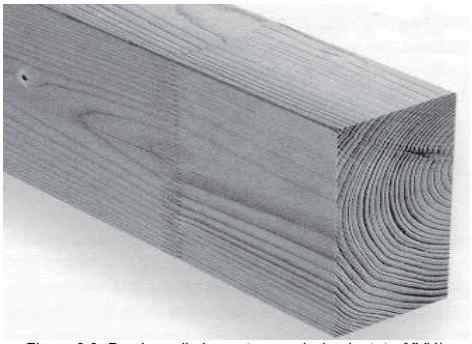


*Figura 3.3: Porzione di elemento massiccio giuntato (*KVH*).*

TRAVI A 2 O 3 LAMELLE

Queste travi sono composte da due o tre tavole, generalmente di abete rosso, e essiccate ed incollate. Questo procedimento serve ad ottenere una sezione di legno massiccio con caratteristiche ben definite, di qualità, che presenterà fessurazioni poco marcate in opera. E' inoltre possibile, tramite la giunzione a pettine, ottenere prodotti di notevole lunghezza. La qualità del prodotto viene garantita, come nel caso del lamellare, dal controllo effettuato in fabbrica e dal successivo controllo da parte di una organizzazione specializzata e indipendente.

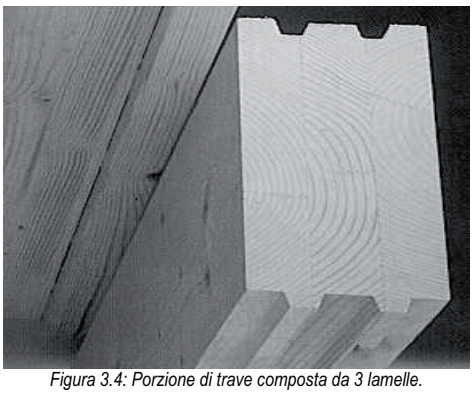


Figura 3.4: Porzione di trave composta da 3 lamelle.

Sul mercato queste travi sono offerte con diverse sezioni trasversali, a seconda del produttore. Le lunghezze disponibili dipendono dalla sezione trasversale e possono raggiungere i 18 m. La lunghezza standard è di 13,5 m. L'impiego di queste travi è ampiamente diffuso nella realizzazioni di tetti e solai, soprattutto per travi a vista ed altri elementi strutturali ma anche decorativi, che non sono direttamente esposti agli agenti atmosferici.

Spessore (mm)	Larghezza (mm)					
	120	140	160	180	200	240
60	♦	♦	♦	♦	♦	♦
80	♦	♦	♦		♦	♦
100	♦				♦	
120	♦				♦	♦

Tabella 3.3:Dimensioni prevalenti in spessori e larghezze del KVH e delle travi a 2 o 3 lamelle.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] AA.VV. (2003), *Il legno massiccio in edilizia*, FEDERLEGNO-ARREDO, Milano.
[2] Giordano G. (1999), *Tecnica delle costruzioni in legno,* Hoepli, Milano.
[3] Lavisci P. (2006), *La progettazione delle strutture di legno,* IlSole24Ore, Milano.
[4] Piazza, Tomasi, Modena (2005), *Strutture di legno*, Hoepli, Milano.
[5] D. M. 14-01-2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni".
[6] UNI EN 14081 – "Strutture di legno - Legno strutturale con sezione rettangolare classificato secondo la resistenza".
[7] UNI 11035 – "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale".
[8] DIN 4074 – "Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit".
[9] UNI EN 385 – "Legno strutturale con giunti a dita – Requisiti prestazionali e requisiti minimi di produzione".

3.2 LEGNO LAMELLARE INCOLLATO

Le caratteristiche e gli standard qualitativi raggiunti soprattutto negli ultimi anni dal legno lamellare incollato rendono questo materiale assolutamente idoneo per il suo impiego in strutture anche progettualmente complesse dal punto di vista statico e in grado di soddisfare senza troppi problemi le esigenze del moderno approccio alla progettazione strutturale. A oggi, il legno lamellare è certamente competitivo, sia in termini tecnici che di costo, con i più comuni materiali da costruzione, quali l'acciaio ed il calcestruzzo.
La tecnologia del legno lamellare incollato ha consentito di superare agevolmente le limitazioni connesse alle dimensioni dei singoli elementi di legno, permettendo in questo modo di coprire luci anche significative e introducendo ulteriori vantaggi come la realizzazione di elementi a sezione variabile e di elementi curvi, quali ad esempio archi e portali. Tale tecnologia consente, inoltre di ovviare a quegli inconvenienti, legati alla difettosità intrinseca del legno, cui sono tradizionalmente soggetti gli elementi di legno massiccio. In particolare, attraverso un'opportuna selezione, lavorazione, classificazione e un assemblaggio mirato delle lamelle è possibile eliminare o ridurre la presenza di nodi, che influiscono negativamente sulle resistenze meccaniche, per esempio scartando le tavole troppo nodose, eliminando alcuni nodi con la tecnica di giunzione di testa ("*finger joint*") e collocando le lamelle più "difettose" nei punti meno sollecitati della sezione dell'elemento strutturale. Componendo l'elemento strutturale con tavole di spessore ridotto è anche possibile controllare meglio l'umidità di ogni singola lamella adeguandola a quelle che saranno le condizioni ambientali di esercizio della struttura e limitando quindi la comparsa di fessurazioni da ritiro ed il rischio di attacco biologico.

PRODUZIONE

Nella produzione degli elementi in legno lamellare i produttori devono obbligatoriamente seguire le prescrizioni di un Ente di certificazione, facendo riferimento alla norma specifica UNI EN 386 ("Legno lamellare incollato. Requisiti prestazionali e requisiti minimi di produzione"), valida per tutti i Paesi dell'Unione Europea, o a norme nazionali più restrittive. Dal 2010 sarà obbligatorio in Italia produrre e commercializzare elementi dotati di marcatura CE, rilasciato da un Ente di Certificazione in conformità alla norma UNI EN 14080 ("Legno lamellare incollato. Requisiti").
La produzione del legno lamellare inizia con la segagione dei tronchi o l'acquisto di segati (generalmente di Abete rosso, a volte di altre specie come Douglasia, Pino, Larice ecc.). Prima di passare alla lavorazione, e una volta essiccate, è buona norma lasciare che le tavole siano comunque fatte acclimatare per almeno una settimana all'interno dei locali, condizionati a una temperatura minima di 15°C e all'umidità relativa del 60±20%. Durante la fase di incollaggio la UNI EN 386 prescrive comunque una temperatura minima di 20°C o 25°C a seconda della temperatura iniziale dei pezzi da incollare, fermo restando prescrizioni differenti da parte del produttore degli adesivi. Il ciclo produttivo prosegue con l'operazione di scelta delle tavole, per assegnarle ad una classe di resistenza mediante classificazione a vista oppure a macchina. Le tavole vengono separate, in modo da poterle diversamente posizionare nella sezione dell'elemento strutturale: le migliori possono essere quindi disposte nelle zone maggiormente sollecitate, le altre in zone meno sollecitate e comunque sempre nelle parti interne. La resistenza a flessione di un elemento di legno lamellare dipende praticamente dalla resistenza a trazione delle lamelle più esterne e quindi anche dalla resistenza dei relativi giunti a dita, che come prescritto dalla norma di riferimento devono essere eseguiti in conformità con la UNI EN 385. Per quanto riguarda la presenza di nodi sulle tavole giuntate con giunti a dita, la UNI EN 385 accetta nell'area interessata dalla giunzione quelli con un diametro massimo pari a 6 mm. Al di fuori della giunzione, la distanza fra il nodo e l'estremità di gola del giunto a dita non deve essere inferiore a 3 volte la larghezza dello stesso. Infine, se una tavola viene sezionata al fine di eliminare un nodo, il taglio deve essere fatto ad una distanza dal bordo del nodo non inferiore a 3 volte il diametro del nodo stesso, per eliminare anche la zona a più forte deviazione della fibratura. Il giunto può comunque essere un elemento di indebolimento della tavola, con resistenze flessionali ridotte anche di ca. il 20% e resistenze a trazione ridotte di ca. il 25% rispetto a quelle della tavola integra. Ciò richiede, quindi, un opportuno posizionamento reciproco dei giunti nella direzione dell'asse longitudinale dell'elemento che si va a formare. In particolare, onde evitare un'eccesiva vicinanza, la distanza orizzontale tra i giunti di lamelle sovrapposte non deve essere inferiore a 20 volte lo spessore delle lamelle stesse. Inoltre, nelle strutture da mettere in opera all'esterno, le lamelle superficiali devono presentare il minore numero possibile di giunti e nelle strutture curve, le zone di massima curvatura devono esserne assolutamente prive.
Per quanto riguarda la sezione delle singole lamelle, la UNI EN 386 fissa i valori massimi di spessore e di area delle sezioni trasversali del tavolame in funzione delle diverse classi di impiego. Nel caso di tavolame con una larghezza maggiore di 20 cm, per ridurre l'effetto di imbarcamento delle tavole tangenziali, viene inoltre raccomandato di praticare piccole scanalature superficiali di forma rettangolare nella parte centrale della sezione trasversale e decorrenti nel senso della lunghezza del pezzo. Secondo tale norma è ammesso realizzare scanalature di larghezza fino a 4 mm e profondità massima pari ad un terzo dello spessore del segato. La norma DIN 1052, per certi aspetti più restrittiva e attualmente seguita da alcuni dei principali produttori, anche italiani, fissa i seguenti limiti: lo spessore del tavolame non deve superare i 33 mm, potendo raggiungere i 40 mm

soltanto nel caso di materiale selezionato con cura e da utilizzare in ambienti che comportano limitate variazioni di umidità del legno. La UNI EN 386 invece fissa in 35 mm lo spessore massimo delle lamelle per l'uso nella Classe di servizio 3 e in 45 mm per le altre Classi (quest'ultimo limite viene abbassato a 40 mm per le lamelle costituite da latifoglie). Per tutti i casi invece, lo spessore massimo delle lamelle viene abbassato nel caso degli elementi curvi in funzione proprio del raggio di curvatura. Sempre la DIN 1052 fissa uno spessore minimo delle lamelle di 6 mm. Il problema della limitazione dello spessore del tavolame si pone certamente con maggiore importanza proprio nel caso di elementi lamellari ad asse curvo. Tali strutture, pur non presentando particolari difficoltà né in fase realizzativa né dal punto di vista tecnologico, tuttavia necessitano di una serie di attenzioni circa il regime tensionale e deformazionale, sia nella fase di esercizio della struttura (problema enfatizzato dal comportamento anisotropo del legno) sia durante le fasi di produzione dell'elemento curvo. Nella realizzazione di elementi curvi, a sezione costante o variabile, lo spessore del tavolame deve essere limitato per evitare l'insorgere di autotensioni, tanto maggiori quanto più grande è il rapporto *t*/*r* (dove *t* è lo spessore della tavola e *r* il raggio di curvatura della stessa). Infatti è noto che la tensione σ_{max} al lembo di una tavola curvata mediante applicazione di momento flettente costante e caratterizzata da modulo di elasticità $E_{0,mean}$ risulta pari a:

$$\sigma_{\max} = \frac{t}{r} \cdot \frac{E_{0,mean}}{2}$$

Si deve comunque ricordare che le autotensioni, che si sviluppano all'atto della messa in forma dell'elemento curvo, risulteranno poi in gran parte attenuate dal favorevole intervento dei fenomeni viscosi nel legno. La norma DIN 1502, che rappresenta il più tradizionale riferimento a livello europeo, impone ad esempio che per la i-esima tavola sia verificata la seguente relazione:

$$\frac{r_i}{t_i} \geq 200$$

Per

$$150 < \frac{r_i}{t_i} < 200$$

si dovranno invece adottare spessori inferiori per le tavole componenti la sezione, variabili rispettivamente tra 10 e 30 mm. La normativa europea fissa invece una riduzione della tensione flessionale di calcolo, $f_{m,d}$, quando risulta

$$\frac{r_{in}}{t_i} < 240$$

mediante il fattore k_r così valutato:

$$k_r = 0.76 + 0.001 \cdot \frac{r_{in}}{t_i}$$

La piallatura del tavolame da giuntare (lamelle) si rende necessaria al fine di garantire una superficie regolare per il successivo incollaggio delle tavole che formeranno l'elemento lamellare.
Il serraggio del pacco di lamelle durante il processo di incollaggio viene realizzato tramite modalità e dispositivi diversi, a seconda dell'azienda produttrice e della forma della struttura. A indurimento dell'adesivo avvenuto, viene poi effettuata la piallatura delle superfici laterali dell'elemento, che elimina i residui della miscela collante e le irregolarità di forma della struttura, e che viene svolta tramite pialle a spessore che consentono ottimi livelli qualitativi. Nel caso di strutture lamellari curve, il manufatto viene opportunamente guidato durante il passaggio nella macchina. Al termine di questa operazione, in alcuni casi, vengono realizzate le necessarie sagomature ed effettuato l'inserimento di componenti di collegamento (connettori, scarpe ecc.), allo scopo di agevolare le successive operazioni di montaggio in cantiere. I nuovi centri di lavoro a controllo numerico sono in grado di eseguire con elevata precisione lavorazioni su cinque facce del pezzo ovvero operazioni di intestatura, foratura, tagli, lavorazioni di profilatura e di inserimento della ferramenta necessaria al montaggio.
Al fine di proteggere il manufatto durante il trasporto e lo stoccaggio in cantiere dall'azione diretta di eventuali precipitazioni atmosferiche, i semilavorati sono normalmente protetti con cartoni catramati, carte kraft o fogli di plastica traspiranti (con microfori). L'uso di fogli di plastica completamente impermeabili risulta invece sconsigliabile, in quanto può favorire fenomeni di condensa che si rivelano particolarmente dannosi nel caso di una lunga permanenza del prodotto nell'imballo.

INCOLLAGGIO

La fase di incollaggio delle lamelle deve essere realizzata entro breve tempo dalla piallatura (la EN 386 fissa un tempo massimo di 24 ore) per evitare fenomeni di ossidazione delle superfici lavorate, che ne riducono la bagnabilità. Nell'incollaggio delle lamelle si utilizzano prevalentemente:

- **adesivi a policondensazione di tipo fenolico o amminoplastico**. Alcuni di essi, di tipo fenolo-formaldeide (PF), resorcinolo-formaldeide (RF) e resorcinolo-fenolo-formaldeide (PRF), sono di colore scuro (rosso-violaceo) mentre altri, di tipo mealmmina-urea-formaldeide (MUF), sono di colore chiaro

(biancastro). Questi ultimi hanno di fatto soppiantato i primi nella produzione di nuovi elementi in legno lamellare;

- **adesivi di tipo poliuretanico**. Sono anch'essi di colore chiaro e sono stati introdotti da pochissimi anni nel mercato. Grazie soprattutto all'ottima versatilità, essi si stanno diffondendo sempre più e attualmente molte delle nuove strutture in legno lamellare vengono prodotte utilizzando questi collanti.

Sta inoltre rivelandosi interessante anche l'uso di resine epossidiche.
Tutti gli adesivi appena descritti consentono di ottenere ottime prestazioni anche in condizioni ambientali difficili e in caso di esposizione diretta agli agenti atmosferici, riuscendo a mantenere sostanzialmente inalterate le proprie caratteristiche nel tempo. Le emissioni di formaldeide libera, che nel caso di altre tipologie di manufatti (per esempio i pannelli) rappresentano un parametro da tenere sotto controllo, non costituiscono invece un problema di interesse nel caso del legno lamellare in considerazione della limitata quantità di adesivo rispetto al volume dell'elemento.
La normativa europea attualmente in vigore prevede che gli adesivi per applicazioni strutturali su legno siano in possesso di determinati requisiti prestazionali misurati conformemente alla norma EN 301. Tale norma classifica gli adesivi in due tipologie a seconda della loro idoneità all'uso in determinate condizioni climatiche:

- ***adesivi di Tipo I***. Possono essere utilizzati anche in condizioni continuative di umidità relativa elevata, ed in particolare di più del 85% a 20°C (in queste condizioni in un elemento di legno lamellare si determina un'umidità del 20% circa all'equilibrio). Tali condizioni di fatto corrispondono alla piena esposizione agli agenti atmosferici, e dunque gli adesivi di Tipo I sono utilizzabili in tutte e 3 le Classi di servizio previste dall'Eurocodice 5 (EN 1995-1-1);
- ***adesivi di Tipo II***. Possono essere usati in condizioni meno drastiche che per il tipo precedente, e dunque per umidità relativa inferiori al 85% e temperature sempre inferiori a 50°C. Queste condizioni corrispondono per esempio a quelle che si riscontrano negli edifici riscaldati e ventilati (quindi in ambienti interni), ma anche nel caso di ambienti esterni protetti o di brevi periodi di esposizione agli agenti atmosferici. Questo tipo di adesivi può dunque essere utilizzato solo per la Classi 1 e 2 previste dall'Eurocodice 5.

Occorre qui evidenziare che il Tipo di adesivo definito dalla EN 301 ed utilizzato per l'assemblaggio degli elementi in legno lamellare incollato va sempre riportato nella marcatura CE che accompagna l'elemento stesso.

Trattandosi di prodotti con un'importante funzione strutturale, nel caso del legno lamellare le modalità di omologazione e controllo di qualità presso lo stabilimento produttivo sono molto severe. Dal momento che le prestazioni del lamellare sono fondamentalmente legate alla qualità dell'incollaggio, quest'ultimo rappresenta la fase più critica dell'intero processo produttivo e quindi richiede la maggiore attenzione nelle operazioni di controllo. Infatti, l'utilizzo di un adesivo idoneo per la Classe di servizio prevista è condizione necessaria ma non sufficiente affinché un elemento in legno lamellare incollato possa essere effettivamente impiegato nella stessa Classe. In particolare, la EN 14080 specifica che vengano rispettati determinati requisiti, che dipendono proprio dalla Classe di servizio, per l'integrità e la resistenza della linea di colla, e che consentono di determinare l'adeguatezza delle specifiche condizioni di incollaggio sulla base di controlli sistematici effettuati secondo piani di campionamento predeterminati. Tali valutazioni devono essere effettuate su provini ricavati da porzioni degli elementi che comprendono l'intera sezione trasversale e devono essere rappresentativi della produzione. Il possesso di tali requisiti, ed in particolare:

- il superamento della prova di delaminazione (valutata secondo la UNI EN 391) per la Classe di servizio 3;
- l'adeguata resistenza a taglio della superficie di incollaggio (valutata secondo la UNI EN 392) per le Classi di servizio 1 e 2;
- l'idoneo valore caratteristico di resistenza a flessione per i giunti di testa (valutata secondo la UNI EN 385) per tutte le Classi di servizio, costituisce un elemento essenziale per la certificazione di processo attestante l'idoneità produttiva e tecnologica dell'azienda da parte degli appositi Organismi autorizzati, che è preliminare all'ottenimento della marcatura CE.

CLASSI DI RESISTENZA

La classificazione del prodotto finito fa riferimento alla norma UNI EN 1194 ("Strutture di legno. Legno lamellare incollato. Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici") con la quale si attribuisce una classe di resistenza al prodotto finito sulla base di quella delle lamelle, di calcoli specifici o di prove di laboratorio eseguite su elementi in dimensione d'uso. La norma prevede un insieme di relazioni per il calcolo delle proprietà meccaniche degli elementi in legno lamellare in funzione della resistenza delle singole lamelle. Le relazioni fondamentali vengono proposte nella Tabella 3.4, in cui i simboli $f_{t,0,l,k}$, $f_{t,90,l,k}$, $f_{c,l,k}$, e $\rho_{l,mean}$ si riferiscono ai valori caratteristici di resistenza (rispettivamente a trazione parallela e perpendicolare alla fibratura, e a compressione parallela alla fibratura) e a valori medi di densità relativi alle *singole lamelle*, mentre i simboli $f_{m,g,k}$, $f_{t,0,g,k}$, $f_{t,90,g,k}$, $f_{c,0,g,k}$, e $\rho_{g,k}$ sono riferiti all'*intero elemento* in legno lamellare. È evidente che in tal modo il produttore di legno

lamellare incollato è in grado di conoscere in partenza quali dovranno essere i requisiti prestazionali delle singole lamelle che andranno a comporre l'elemento ai fini della formazione di un manufatto con una predeterminata classe di resistenza, così come generalmente richiesto dal progettista.
Tali classi di resistenza predeterminate sono state riportate in Tabella 3.4, in cui è anche evidente come la UNI EN 1194 prevede che, per gli elementi sottoposti prevalentemente a flessione, si possa utilizzare sia il legno lamellare omogeneo (contrassegnato dalla lettera ***h***) che il combinato (contrassegnato dalla lettera ***c***).
È possibile che, nel corso della progettazione, si manifesti l'esigenza di ridurre la sezione di un elemento di una data classe attraverso la diminuzione della *larghezza* delle lamelle. Tuttavia, è meglio non eseguire tale operazione in quanto in questo modo l'elemento può cambiare classe di resistenza per il fatto che cambiano le dimensioni relative dei difetti rispetto alla larghezza stessa. È invece possibile ridurre la sezione eliminando alcune lamelle senza che l'elemento cambi di classe di resistenza, ma solo nel caso del legno lamellare omogeneo.
È ancora possibile trovare in commercio elementi in legno lamellare in cui la classe di resistenza sia contraddistinta attraverso il sistema di classificazione della norma DIN 1052, che per anni è stata il principale riferimento tecnico per molti produttori in Europa. Per tale motivo, in Tabella 3.6 si riporta l'equivalenza tra la normativa europea attuale e la classificazione prevista dalla UNI EN 1194.
La specie legnosa più comunemente disponibile in commercio per gli elementi in legno lamellare è l'Abete. Laddove ci siano delle esigenze specifiche, occorre dunque che questo venga espressamente indicato nei capitolati. Ad esempio, in certi casi può essere utile l'impiego di elementi in larice, che è una specie maggiormente durabile.

COMPORTAMENTO MECCANICO

Il comportamento meccanico (nella fattispecie il legame costitutivo) del legno lamellare, come d'altronde quello del legno massiccio, può essere descritto da differenti modelli, ciascuno caratterizzato da un diverso grado di approssimazione. Tuttavia esistono assunzioni comuni a tutti i modelli, che sono di particolare importanza per il progettista. In particolare, il *comportamento a* ***trazione*** si considera lineare fino a rottura, con un diagramma a pendenza costante. Il *comportamento a* ***compressione*** nella direzione parallela alla fibratura è invece caratterizzato da un tratto (la cui estensione dipende dal modello considerato) che si può ragionevolmente considerare a inclinazione costante, e che ha una tangente all'origine con pendenza uguale a quella della curva che deriva dal comportamento in trazione. Da queste circostanze si evince che il modulo di elasticità normale si può ricavare semplicemente dalla pendenza del tratto lineare del diagramma tensione-deformazione.
Per quanto riguarda il comportamento a rottura di una trave sottoposta a flessione semplice, in linea di massima occorre tener presente che non è detto che la modalità di collasso del legno lamellare sia la stessa che per il legno massiccio. Infatti, le prove evidenziano che difficilmente viene raggiunta la plasticizzazione al lembo compresso, per cui il materiale mostra in genere una maggiore tendenza alla rottura fragile. Questo comportamento è comunque fortemente influenzato dalla qualità del legno utilizzato e dall'accuratezza nella scelta delle tavole in fase di produzione/assemblaggio.

Proprietà	**Relazione (EN 1194)**
Flessione (N/mm^2)	$f_{m,g,k}= 7 + 1{,}15\ f_{t,0,l,k}$
Trazione (N/mm^2)	
parallela alla fibratura	$f_{t,0,g,k} = 8 + 0{,}8\ f_{t,0,l,k}$
perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,g,k} = 0{,}2 + 0{,}015\ f_{t,0,l,k}$
Compressione parall. alla fibratura (N/mm^2)	$f_{c,0,g,k} = 7{,}2\ f_{t,0,l,k}^{0,45}$
Densità (kg/m^3)	$\rho_{g,k} = 1{,}10\ \rho_{l,mean}$

Tabella 3.4: Caratteristiche meccaniche del legno lamellare.

Classe resistente del legno lamellare	**GL24**	**GL28**	**GL32**
Classe resistente delle tavole (***L.L. omogeneo, h***)	C24	C30	C40
Classe resistente delle tavole (***L.L. combinato, c***)	C24/C18	C30/C24	C40/C30

Tabella 3.5: Classi di resistenza del legno lamellare e delle lamelle costituenti.

DIN 1052 (vers. 1988)	DIN 1052 (vers. 1996)	EN 1194
II	BS11	GL24h – GL24c
I	BS14	GL28h – GL28c
non prevista	BS16	GL32h – GL32c
non prevista	BS18	GL36h – GL36c

Tabella 3.6: Confronto tra la classificazione del legno lamellare secondo le normative DIN 1052 e UNI EN 1194.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] AA.VV. (2003), *Il legno massiccio in edilizia*, FEDERLEGNO-ARREDO, Milano.
[2] UNI EN 386 – "Legno lamellare incollato – Requisiti prestazionali e requisiti minimi di produzione".
[3] UNI EN 14080 – "Strutture di legno – Legno lamellare incollato - Requisiti".
[4] UNI EN 387 – "Legno lamellare incollato – Giunti a dita a tutta sezione – Requisiti presali e requisiti minimi di produzione".
[5] DIN 1052 – "Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken . Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau".
[6] UNI EN 301 – "Adesivi fenolici e amminoplastici per strutture portatnti in legno. Classificazione e requisiti prestazionali".
[7] UNI EN 391 – "Legno lamellare incollato – Prova dazione delle superfici di incollaggio".
[8] UNI EN 392 – "Legno lamellare incollato – Prova di resistenza a taglio delle superfici di incollaggio".
[9] UNI EN 385 – "Legno strutturale con giunti a dita – Requisiti prestazionali e requisiti minimi di produzione".
[10] UNI EN 1194 – "Strutture di legno - Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici".

3.3 PANNELLI A BASE DI LEGNO

L'impiego dei pannelli a base di legno in combinazione con elementi in legno massiccio ha consentito lo sviluppo e l'evoluzione del sistema costruttivo cosiddetto ***platform frame***, che rappresenta da vari decenni lo standard dell'edilizia residenziale in USA e Canada e che si sta rapidamente diffondendo in molti altri Paesi Europei, inclusa l'Italia. Si tratta di un sistema rapido che, oltre alla velocità di esecuzione, permette di ottenere una buona sicurezza statica e sismica.

TIPOLOGIE

I pannelli a base di legno vengono prodotti in una vasta gamma di tipologie, ed essi sono in grado di soddisfare le varie esigenze tecniche del progettista. Considerata l'elevata disponibilità merceologica, appare necessario effettuare, al momento della scelta, delle precise valutazioni di tipo tecnico che si basino su un'adeguata conoscenza delle caratteristiche prestazionali dei materiali e che devono essere condotte con riferimento alle condizioni di posa in opera e di esercizio previste. Ciò appare tanto più importante quando prodotti apparentemente molto simili tra loro sono reperibili a prezzi assai diversi.
Ai fini applicativi è possibile scegliere tra alcune principali tipologie commerciali:

- ***pannelli di legno massiccio***, noti anche come "pannelli lamellari". Sono composti da listelli o tavolette ottenuti per segagione e incollati tra loro lungo i bordi o, nel caso di pannelli a più strati, anche sulle facce. Il loro aspetto superficiale può evidenziare elementi interi o giuntati longitudinalmente ("di testa");

Figura 3.5: porzione di pannello di legno massiccio di conifera.

- ***pannelli di legno compensato*** e ***multistrati***. Sono formati da un insieme di strati (solitamente dispari) di sfogliati sovrapposti e con la direzione della fibratura del legno disposta alternativamente ad angolo retto. Alcune tipologie sono idonee per uso strutturale;

Figura 3.6: porzione di pannello multistrato.

- ***LVL*** (acronimo dall'inglese *Laminated Veneer Lumber*), come ad es. il Kerto®. Si tratta di un prodotto formato da strati di sfogliato sovrapposti incollati, con fibratura parallela e per lo più giuntati di testa. Tale prodotto viene industrialmente realizzato in continuo, o comunque in grandi dimensioni, ed è destinato soprattutto ad impieghi strutturali;

- ***pannelli listellari***. Presentano strati esterni di sfogliato od altro materiale ed uno strato (a volte anche più) di maggior spessore, in genere costituito da listelli o lamelle a formare la cosiddetta "anima" del pannello;
- ***pannelli di particelle*** ("***truciolari***"). Sono composti da materiale legnosi di varia provenienza (tipicamente riciclati) ridotti in frammenti più o meno allungati e incollati tramite pressatura tra piastre piane riscaldate o, in un processo continuo, tramite calandratura;

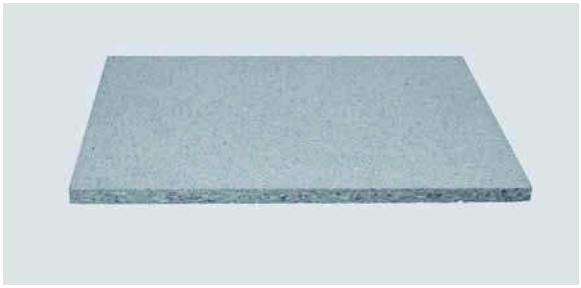


Figura 3.7: porzione di pannello di particelle.

- ***pannelli di scaglie***. Le scaglie possono essere orientate, come nel caso dell'***OSB*** (acronimo dall'inglese *Oriented Strand Board*), oppure non orientate, come nel caso dei "***waferboard***". Anche in questo caso le scaglie vengono incollate per pressatura a caldo;

Figura 3.8: Pannelli OSB utilizzati in una copertura industriale.

- ***pannelli di fibre***. Sono formati sostanzialmente dalla stessa materia prima dei pannelli di particelle, che però in questo caso vengono ridotte, tramite sfibratura, a dimensioni ancor più minute. In base al diverso processo produttivo, che ne condiziona anche la densità finale, essi possono essere ulteriormente distinti in pannelli di fibre ottenuti per via umida o per via secca: secondo la normativa attuale, i primi vengono a loro volta classificati in pannelli duri (tipo ***HB***, con massa volumica $\geq$ 900 kg/m^3), pannelli semiduri (tipo ***MBH***, con massa volumica compresa tra 400 e 900 kg/m^3) e pannelli teneri (tipo ***SB***, con massa volumica < 400 kg/m^3), mentre i secondi comprendono, in particolare, i pannelli ***MDF*** (acronimo dall'inglese *Medium Density Fiberboard*);
- ***pannelli in legno-cemento***, ottenuti facendo uso di leganti minerali (per lo più, malte di tipo magnesiaco o cementizio) che hanno la funzione di agglomerare e consolidare elementi unitari costituiti da lana di legno (come nel caso dei pannelli tipo "Eraclit®") o da particelle o fibre (ad esempio, nei pannelli tipo "Viroc®" e "PLS®").

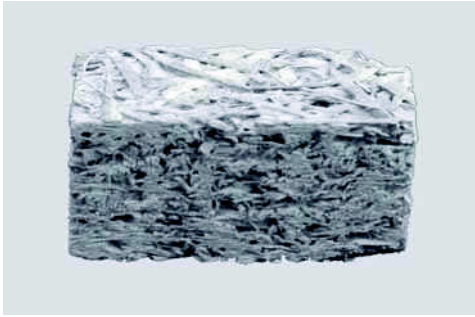


Figura 3.9: Porzione di pannello in legno-cemento.

La maggior parte delle caratteristiche tecnologiche dei pannelli a base di legno risulta influenzata dai seguenti parametri (in ordine di importanza):

- dimensione e disposizione degli elementi unitari e loro specie legnosa;
- tipo di adesivo (e degli eventuali additivi) e qualità dell'incollaggio;
- massa volumica ed umidità del prodotto finito.

Il primo di questi parametri è comunque quello che ha la maggiore influenza rispetto agli altri. La riduzione delle dimensioni degli elementi legnosi unitari che costituiscono il pannello comporta infatti una serie di conseguenze sia sull'aspetto finale che sulle prestazioni del manufatto (vedi Figura 3.10), oltre che influenzare apprezzabilmente l'impiantistica richiesta per la sua produzione.

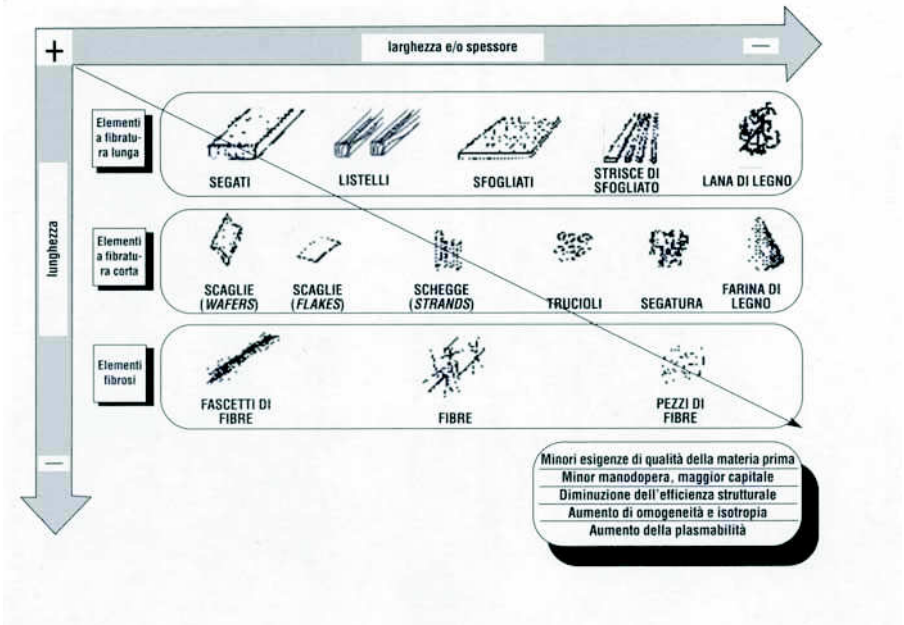


Figura 3.10: Tipologie di elementi unitari utilizzati nella composizione dei più comuni prodotti a base di legno. Le dimensioni degli elementi determinano le caratteristiche finali dei compositi con essi realizzati (da : Marra modificato).

I pannelli ottenuti dalla ricomposizione di elementi unitari quali segati, listelli e sfogliati, ricavabili solo da tronchi di elevate dimensioni e buona qualità, hanno ancora buona parte delle caratteristiche proprie del legno massiccio da cui derivano. In altri termini, essi mantengono un certo grado di anisotropia, un elevato livello di resistenza lungo una direzione preferenziale (parallelamente alla fibratura degli elementi principali) e spesso evidenziano ancora le tipiche caratteristiche morfologiche della materia prima originaria (venatura, disegno ecc.). Quelli realizzati dall'aggregazione di particelle o fibre possono essere invece ottenuti a partire da materiale meno pregiato (ad esempio, da assortimenti di piccole dimensioni o da scarti delle prime lavorazioni del legno), ma risultano più stabili nei confronti di variazioni igro-termiche ambientali, molto uniformi nelle loro caratteristiche fisico-meccaniche e, se necessario, sono in grado di assumere e mantenere forme o curvature complesse. Presentano comunque una minore resistenza specifica rispetto a quelli che presentano la continuità delle

fibratura del legno per lunghi tratti, recuperabile solo in parte aumentando la pressione di ricomposizione o la quantità di adesivo. Un maggiore effetto si ottiene invece mediante un miglior allineamento degli elementi unitari.
In funzione delle modalità e criteri di ricomposizione, si possono realizzare prodotti omogenei, formati cioè da elementi unitari dello stesso tipo (come, ad esempio, un pannello di legno massiccio), o prodotti eterogenei, che presentano due o più elementi diversi (come un pannello listellare). Nel caso del compensato la composizione del pannello è generalmente organizzata utilizzando sfogliati di qualità migliore per le porzioni superficiali del pannello e sfogliati con una maggiore quantità di difetti negli strati interni. E' anche previsto l'uso di sfogliati di specie legnose diverse (i cosiddetti pannelli "combi") che, con le loro caratteristiche intrinseche, contribuiscono ad influenzare le proprietà del pannello finito, ampliando la diversificazione dei prodotti ottenibili. I pannelli di particelle o di scaglie possono prevedere un'organizzazione casuale delle stesse, una loro deposizione in allineamenti prestabiliti (tipica dell'OSB) o la stratificazione secondo una distribuzione simmetrica di elementi che presentano una granulometria progressiva dalla superficie verso l'asse mediano dello spessore del pannello, destinando così le particelle più fini per le facce e le più grossolane per gli strati interni (come nel caso del truciolare). Ulteriori opzioni si possono ottenere con una seconda operazione di pressatura che consente, ad esempio, di produrre "pannelli rivestiti", detti anche "placcati", le cui superfici sono composte da tranciati di specie pregiate (che mettono meglio in risalto le caratteristiche decorative del legno) incollati su di un supporto generalmente costituito da un compensato, un listellare, un pannello truciolare o di fibre, o realizzando altre tipologie di compositi facendo uso di rivestimenti o inserti di vario tipo. Analogamente, è possibile ricorrere a varie tipologie di miscele collanti (ad esempio, quelle ureiche idonee per uso in ambiente asciutto e quelle melamminiche o fenoliche per uso in ambiente umido ed esterno) e l'aggiunta di sostanze accessorie che danno origine a prodotti più o meno elaborati e innovativi, consentendo svariate soluzioni tecniche.
Altre tipologie di pannelli compositi derivano infine dall'incollaggio di vari tipi di pannelli a base di legno (ad esempio un listellare con facce in MDF) o quelli in cui si fa uso di materiali di diversa natura (plastici, metallici ecc.), allo scopo di incrementare alcune proprietà del nuovo manufatto così ottenuto, che non sarebbero soddisfatte dai singoli componenti (la laccatura, il comportamento acustico e termico o l'impermeabilità al vapore). Tra le tipologie più diffuse in edilizia di questo tipo di "pannelli sandwich" si possono ricordare:

- quelli strutturali e termoisolanti con inserto in polistirene espanso e facce in compensato, OSB o legno massiccio. L'impiego tipico è quello di coperture ed orizzontamenti strutturalmente efficienti, leggeri e rapidi da installare, come valida alternativa al solaio di copertura in laterocemento, sotto il profilo sia tecnico che economico: infatti, mentre per mettere in opera 200 m^2 di soletta in cemento con isolante e guaina occorre almeno una settimana, con questo tipo di pannelli la posa richiede una sola giornata;

Figura 3.11: Varie tipologie di pannelli sandwich per uso strutturale.

- quelli con uno o più strati di elastomeri (capaci di conferire al composito specifiche proprietà di fono isolamento), di acciaio o alluminio (per migliorare l'effetto di barriera vapore), o ancora di fibre di vetro (per aumentarne le caratteristiche meccaniche).

CLASSIFICAZIONE

La classificazione dei pannelli a base di legno può seguire criteri diversi che portano a classificazioni diverse. In generale, la classificazione può essere effettuata in base all'aspetto o alla qualità delle superfici, al tipo di adesivo utilizzato, alla specie legnosa, al campo di applicazione, alla composizione o forma del pannello stesso o in funzione di esigenze specifiche.
Le normative tecniche che descrivono le prestazioni e le caratteristiche dei pannelli a base di legno sono oltre 70. A titolo di esempio, le specifiche per i pannelli di legno compensato, che sono tra i più utilizzati in ambito strutturale, sono fissate nella norma EN 636. Essi presentano requisiti differenti a seconda del loro utilizzo:

- **in ambiente asciutto**, corrispondente ad un normale clima di interni;
- **in ambiente umido**, corrispondente ad applicazioni in esterni protetti oppure esposti direttamente agli agenti atmosferici ma per brevi periodi di tempo (per esempio durante la costruzione);
- **in ambiente esterno**, corrispondente ad un'esposizione agli agenti atmosferici per periodi di tempo prolungati.

Sia le specie utilizzate per gli sfogliati sia gli adesivi impiegati per gli incollaggi devono essere compatibili con la classe di utilizzo prevista. Nel caso degli adesivi, per esempio, questo implica che provini ricavati dai pannelli dovranno essere soggetti a differenti trattamenti e dovranno superare differenti soglie minime di resistenza meccanica affinché il manufatto possa essere considerato idoneo all'uso nella classe considerata.
Tra le più importanti norme di classificazione è necessario ricordare:

- quelle che riportano le specifiche di prodotto per tipologia (EN 300 per gli OSB; EN 312 per i truciolari; EN 622 per i pannelli di fibra; EN 634 per i pannelli legno/cemento; EN 636 per i compensati; UNI 9714 per i pannelli in lana di legno). Tali norme descrivono le varie tipologie e riportano le relative caratteristiche e tolleranze dimensionali;
- le "Specifiche prestazionali e requisiti" e la "Guida per l'utilizzo" dei pannelli portanti nei pavimenti, nei muri e nelle coperture (EN 12871 e CEN/TS 12872);
- le norme riportanti i valori caratteristici per la progettazione strutturale (EN 12369-1 e 2), misurati secondo EN 789 ed EN 1058;
- le norme relative alle prove strutturali di manufatti (EN 1195 per gli assiti portanti di solai; EN 594 per pareti con telaio di legno; EN 596 per l'impatto con un corpo morbido su pareti con telaio di legno);
- nel caso di pannelli destinati a rimanere visibili, occorre specificare la classe di aspetto estetico delle facce (EN 635 per il compensato, EN 13017 per i pannelli di legno massiccio).

A titolo di esempio si riportano nella Tabella 3.7 e Tabella 3.8, per alcune tipologie di pannelli, i valori caratteristici a flessione riportati nella norma EN 12369-1 ("Pannelli a base di legno. Valori caratteristici per la progettazione strutturale. OSB, pannelli di particelle e pannelli di fibra") e nella EN 12369-2 ("Pannelli a base di legno. Valori caratteristici per la progettazione strutturale. Parte 2: Pannelli di legno compensato").
Occorre tenere presente che è attualmente in vigore una norma europea (la EN 13986) che definisce i pannelli a base di legno per l'utilizzo nelle costruzioni e specifica le rispettive caratteristiche e gli idonei metodi di prova per determinare queste caratteristiche per i pannelli a base di legno grezzi, nobilitati, placcati o verniciati, per l'utilizzo nelle varie Classi di servizio previste dall'Eurocodice 5 (EN 1995-1-1). La norma inoltre prevede la valutazione della conformità e i requisiti per la marcatura CE di questi prodotti.
Conoscere la normativa vigente e richiamarla nelle voci di capitolato è necessario per una corretta progettazione ed una ottimale gestione degli acquisti. Per l'importanza che i pannelli a base di legno hanno nell'edilizia, si sono diffusi da tempo vari marchi di qualità gestiti da organismi indipendenti che sono ben noti nel settore, a livello nazionale ed internazionale. La maggior parte delle aziende, inoltre, si sono dotate da tempo di sistemi di gestione della qualità conformi alla norma ISO 9000.

Spessore, mm	**Massa Volumica (kg/m^3)**	**Valori caratteristici di resistenza a flessione (N/mm^2)**	
t_{nom}	ρ	f_m	
		0	90
>6 a 10	550	18,0	9,0
>10 a 18	550	16,4	8,2
>18 a 25	550	14,8	7,4

Tabella 3.7: Valori caratteristici di massa volumica e resistenza a flessione per pannelli OSB/2 (pannelli portanti per uso in ambiente secco, da utilizzare in Classe di servizio 1) e OSB/3 (pannelli portanti per uso in ambiente umido, da utilizzare in Classe di servizio 1 e 2). I valori caratteristici devono essere modificati in base alla EN 1995-1-1 per la Classe di servizio e la durata del carico (k_{mod}, k_{def}).

Classe (EN 636)	Valore caratteristico minimo, $f_{m,k}$, di resistenza a flessione (N/mm^2)
F 3	3
F 5	5
F 10	10
F 15	15
F 20	20
F 25	25
F 30	30
F 40	40
F 50	50
F 60	60
F 70	70
F 80	80

Tabella 3.8: Valori caratteristici di resistenza a flessione per una serie di classi di resistenza per pannelli di legno compensato conformi alla EN 636. I valori caratteristici devono essere modificati in base alla EN 1995-1-1 per la Classe di servizio e la durata del carico(k_{mod}, k_{def}).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] AA.VV. (2003), *Il legno massiccio in edilizia,* FEDERLEGNO-ARREDO, Milano.
[2] Marra A.A (1992), *Technology of wood bonding. Principles in practice*, Van Nostrand Reinhold, New York.
[3] UNI EN 636 – "Pannelli di legno compensato - Specifiche".
[4] UNI EN 300 – "Pannelli di scaglie di legno orientate (OSB) - Definizioni, classificazione e specifiche".
[5] UNI EN 312 – "Pannelli di particelle di legno - Specifiche".
[6] UNI EN 622 – "Pannelli di fibra di legno - Specifiche - Requisiti generali".
[7] UNI EN 634 – 2– "Pannelli di particelle di legno legate con cemento - Specifiche - Parte 2: Requisiti dei pannelli di particelle di legno legate con cemento Portland ordinario per utilizzo in ambiente secco, umido e all'esterno".
[8] UNI 9714 – "Pannelli a base di legno. Pannelli di lana di legno. Tipi, caratteristiche e prove."
[9] UNI EN 12871 – "Pannelli a base di legno – Specifiche prestazionali e requisiti per pannelli portanti utilizzati nei pavimenti, nei muri e nelle coperture".
[10] UNI CEN/TS 12872 – "Pannelli a base di legno - Guida per l'utilizzo dei pannelli portanti nei pavimenti, nei muri e nelle coperture".
[11] UNI EN 12369-1 "Panelli a base di legno – Valori caratteristici per la progettazione strutturale – OSB, pannelli di particelle e pannelli di fibra".
[12] UNI EN 12369-2 – "Pannelli a base di legno - Valori caratteristici per la progettazione strutturale - Parte 2: Pannelli di legno compensato".
[13] UNI EN 789 – "Strutture di legno. Metodi di prova. Determinazione di proprietà meccaniche di pannelli a base di legno".
[14] UNI EN 1058 – "Pannelli a base di legno. Determinazione dei valori caratteristici delle proprietà meccaniche e della massa volumica".
[15] UNI EN 1195 – "Strutture di legno – Metodi di prova – Comportamenti di assiti portanti di solai".
[16] UNI EN 594 – " Metodi di prova. Resistenza rigidezza di piastra di pannelli per pareti con telaio di legno".
[17] UNI EN 596 – "Strutture di legno. Metodi di prova. Prova di impatto con un corpo morbido su telaio di legno".
[18] UNI EN 635 – "Pannelli di legno compensato. Classificazione in base all'aspetto delle facce. Latifoglie".
[19] UNI EN 13017 – "Pannelli di legno massiccio - Classificazione in base all'aspetto delle facce".
[20] UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici.
[21] Norma ISO 9000 – "Sistemi di gestione per la qualità - Fondamenti e terminologia".

3.4 PANNELLI DI LEGNO MASSICCIO A STRATI INCROCIATI

La più recente ed interessante evoluzione del legname strutturale, per certi aspetti "figlia" del legno lamellare e del pannello compensato, è il "compensato di tavole" ovvero il pannello costituito da strati incrociati di tavole, chiodate o incollate. Questa famiglia di prodotti, che hanno in comune il concetto di base ma sono assai eterogenei per dimensioni, composizione e processo produttivo, ha conosciuto una forte diffusione in tempi molto rapidi: nel 2000 quasi non esistevano sul mercato Italiano, oggi sono considerati la soluzione costruttiva più interessante per l'edilizia residenziale. Il tutto, in assenza di esplicite indicazioni normative, sia a livello nazionale che europeo (il DM 14-01-2008 e l'EC5 neppure li menzionano, invece le CNR DT 206-2007 lo fanno, ma solo per rimarcare l'assenza di una specifica normativa e rinviare al benestare tecnico di cui dovrebbe essere dotato ogni prodotto) ma soprattutto in assenza, da parte di molti produttori, anche delle indicazioni "necessarie e sufficienti" in merito alle modalità di calcolo e di realizzazione dei collegamenti.
Ma, nonostante una certa improvvisazione da parte di produttori e progettisti, le qualità intrinseche del concetto di base (un setto portante "pieno", dotato di buona stabilità dimensionale e "massa" elevata) ha consentito a questi prodotti di bruciare le tappe e affermarsi come la più significativa novità del settore dall'introduzione del legno lamellare. Il pannello a strati incrociati è riuscito a far guadagnare alla costruzione in legno quella fiducia da parte dei progettisti Italiani che il sistema di gran lunga più sperimentato e codificato (il "platform frame") non era riuscito ad ottenere per la sua "leggerezza" e il sistema più tradizionale (il "blockhaus") non era riuscito a conquistarsi per la sua intrinseca mancanza di flessibilità e di economicità.
Quindi onore al merito, ma anche attenzione: per usare in maniera tecnicamente corretta ed economicamente efficiente i pannelli a strati incrociati bisogna conoscerli bene, sia a livello merceologico che prestazionale. Chi desidera sfruttarne appieno le potenzialità deve impegnarsi, per adesso, a investire nella progettazione un tempo superiore a quello richiesto dai prodotti più standardizzati e omologati, oppure affidarsi in maniera quasi completa alle indicazioni dei fornitori. Per questo motivo stanno sviluppandosi degli approcci più integrati, che portano alla definizione di "sistemi costruttivi" specifico di un fornitore, dalle prestazioni ben definite.

ASPETTI MERCEOLOGICI

La prima, fondamentale divisione è tra pannelli incollati e inchiodati. Entrambe le soluzioni hanno vantaggi e limiti, che i relativi produttori espongono. Dal nostro punto di vista, possiamo solo ricordare al progettista di cercare di compararli su base oggettiva, con riferimento a metodi di misura identici. Anche se ciò non è facile, dal momento che la normativa specifica è ancora carente (ma fortunatamente in evoluzione).
Attualmente un riferimento utile è la EN 13353 che definisce i requisiti per pannelli di spessore < 80 mm. Anche se ormai sono in uso quasi esclusivamente spessori maggiori, alcuni riferimenti di tale norma possono essere comunque utili, come ad esempio le tolleranze dimensionali, la qualità dell'incollaggio e le caratteristiche meccaniche. La Tabella 3.9 ne sintetizza i contenuti. I primi due parametri non sono da prendere come riferimenti assoluti, perché la norma in questione è stata redatta quasi contestualmente allo sviluppo dei prodotti più diffusi, ma certamente possono essere intesi come un elemento di riscontro. Le caratteristiche meccaniche, invece, sono chiaramente da intendersi come valori "di massima", largamente indicativi, in quanto i singoli produttori, variando le composizioni del pannello in termini di spessore e classe di resistenza delle tavole, composizione del pannello, metodo di connessione (incollaggio o chiodatura) arrivano a delle prestazioni completamente diverse, che è giusto conoscere nel dettaglio per poter effettuare dei calcoli affidabili.

TOLLERANZE DIMENSIONALI (misure secondo EN 324)				
Lunghezza e larghezza nominali	Spessore, singolo pannello	Spessore nominale	Rettilineità dei bordi	Ortogonalità dei bordi (squadratura)
± 2 mm	0,5 mm	± 1 mm	1 mm/m	1 mm/m

QUALITÁ DELL'INCOLLAGGIO (prove secondo CEN/TS 13354)	
Resistenza a taglio (5° percentile)	> 0,8 N/mm^2
Rottura nel legno (media, per singolo pannello)	> 40%

CARATTERISTICHE MECCANICHE PER PANNELLI CON SPESSORE 30-80 mm (prove secondo EN 789)	
Densità	> 420 kg/m^3
Resistenza a flessione perpendicolare al piano del pannello, direzione L	> 10 N/ mm^2
Resistenza a flessione perpendicolare al piano del pannello, direzione T	> 5 N/ mm^2
Modulo elastico a flessione perpendicolare al piano del pannello, direzione L	> 5.000 N/ mm^2
Modulo elastico a flessione perpendicolare al piano del pannello, direzione T	> 500 N/ mm^2

Tabella 3.9: Sintesi dei requisiti della EN 13353:2004, applicabile a pannelli fino a 80 mm di spessore.

Sempre in ambito merceologico, le dimensioni dei pannelli e la tipologia di lavorazioni possibili sono un parametro determinante per l'ottimizzazione del piano di tagli, delle modalità di trasporto e posa, della tipologia e quantità di giunti da effettuare. I prodotti sul mercato variano da 16 a 24 m in lunghezza, da 1,25 a 4 m in larghezza, da 57 a 400 mm in spessore. Non tutte le combinazioni intermedie sono possibili, quindi è utile conoscere con precisione l'offerta dei vari fornitori, sia come tipologie "standard" che "su richiesta".

Il tipo di colla o chiodi usati ha un'influenza determinante sul campo di applicazione: attualmente sono previsti impieghi in Classe di Servizio 1 e 2, ma in futuro non possono escludersi quelli in classe 3.
Anche le specie legnose con cui vengono realizzati i pannelli possono variare oltre al tradizionale abete (rosso e/o bianco) alcuni produttori offrono pannelli in larice, pino, douglasia. Analogamente, la scelta delle tavole esterne e le lavorazioni superficiali possono portare a ottenere una qualità estetica "a vista" oppure "industriale" (per impieghi non a vista). Per gli impieghi "a vista" si sottolinea l'utilità di definire con precisione, assieme al produttore, le caratteristiche ammissibili (tipo di nodi, tasselli, tasche di resina, bluettatura (moschettatura), giunti, fessure…) dal momento che la normativa di riferimento (EN 13017-1), citata da vari produttori, viene sostanzialmente applicata in maniera non molto coerente (Tabella 3.10).
Infine, la possibilità di realizzare in condizioni di stabilimento delle lavorazioni di taglio, fresatura, profilatura dei bordi può determinare la convenienza a non eseguirle in cantiere dove sono certamente, in linea generale, più onerose e suscettibili di errori, anche se più facili da correggere.
Volendo suggerire ai colleghi di dedicare maggiore attenzione agli aspetti più rilevanti, sono da citare: l'incollaggio sul fianco (spessore) della lamella, i tasselli, le tasche di resina, l'omogeneità della larghezza delle lamelle. Gli altri parametri (nodi, midollo, corteccia…) sono comunque regolati dalla classificazione in base alla resistenza, che ci porta a considerare la prevalenza, come importanza, degli aspetti prestazionali.

	CLASSI DI ASPETTO, LEGNO MASSICCIO MULTISTRATO DI CONIFERA		
Caratteristiche	A	B	C
Incollaggio	Nessuna linea di incollaggio aperta	Giunti aperti ≤ 100mm/1m di linea di incollaggio consentito	
Aspetto e colore	Ben bilanciati	Ampiamente bilanciati	Nessun requisito
Nodi	Abete rosso: nodi sani e aderenti fino a un Ø 40 mm Pino e larice: nodi sani e aderenti fino a un Ø 60 mm, singoli nodi neri	Nodi sani e aderenti e singoli nodi neri.	Consentiti, qualsiasi tipo e dimensione.
Tasselli circolari [a)]	Consentiti se circolari e naturali	Consentiti	
Tasche di resina	Singola fino a 3x40 mm	Singola fino a 5x50 mm	Consentite
Tasche di resina riparate	Consentite		
Inclusioni di corteccia	Non consentite	Singola consentita	Consentite
Fessurazioni	Singole incrinature superficiali	Singole fessurazioni fino a 50 mm di lunghezza	Consentire
Midollo	≤ 400 mm di lunghezza	Consentito	
Legno di compressione	Occasionalmente consentito	Consentito	
Attacco da insetti	Non consentito		Singoli fori, piccoli e inattivi
Scolorimento	Non consentito	Leggero	Consentito
Carie	Non consentita		
Alburno	Consentita per pino; fino al 20% della larghezza per larice	Consentito	
Spessore della linea di incollaggio	≤ 0,2 mm	≤ 0,3 mm	Nessun requisito
Qualità di lavorazione della superficie e dei bordi	Piccoli difetti singoli consentiti	Difetti singoli consentiti	Nessun requisito
Larghezza delle singole lamelle	≥ 60 mm (non per i bordi)	Nessun requisito	
[a)] misurazione dei tasselli ovali come per i nodi			

Tabella 3.10: Principali parametri di aspetto estetico della faccia per pannelli di legno massiccio di conifera, multistrato, secondo EN 13017-1. Alcune indicazioni non sono oggettive. All'atto pratico, i principali produttori dichiarano di fornire una classe intermedia ("AB" o "BC") senza specificare cos'è ammesso e cosa no, come sarebbe invece utile. Pertanto, se il requisito estetico è importante, è necessario chiarirlo in sede contrattuale.

ASPETTI PRESTAZIONALI

Sul piano prestazionale, la più importante qualità del compensato di tavole è la completezza: lo si capisce bene analizzando la maniera con cui, in termini generali, questa tipologia di prodotti risponde ai 6 Requisiti Essenziali della Direttiva 89/106 (Tabella 3.11). Per il requisito aggiuntivo "sostenibilità" che sarà prossimamente inserito nella Direttiva e che è già ben presente a chi sceglie il legno come materiale da costruzione, i vantaggi sono evidenti.

Requisito	Prestazioni tipiche del compensato di tavole
Resistenza meccanica	Ottimo rapporto peso/prestazioni, buona isotropia nel piano, elevata stabilità dimensionale.Facile ottenere strutture con elevata duttilità, progettando bene i giunti.
Sicurezza in caso d'incendio	Facile ottenere una resistenza al fuoco elevata, in funzione degli spessori impiegati, spesso ridondanti. Assenza di fumi tossici o scuri (in caso d'incendio, sono questi i fattori maggiormente pericolosi).
Igiene, salute ed ambiente	Assenza di emissioni inquinanti e/o polveri. Assenza di formaldeide per pannelli incollati con adesivi di tipo poliuretanico o chiodati. Bassa emissione di formaldeide per pannelli incollati con MUF (melamina-urea-formaldeide).
Sicurezza di utilizzazione	Facili da manovrare in cantiere, sicuri come resistenza all'impatto, non più scivolosi rispetto ad altri materiali a base di legno.
Protezione contro il rumore	Una massa più elevata, rispetto alla costruzione a telaio e pannelli, fornisce automaticamente un migliore isolamento, anche alle frequenza più basse.
Risparmio energetico	La conducibilità è quella del legno (U=0,13 W/mK) quindi l'elemento strutturale è già anche isolante, e possiede una buona inerzia (utile per lo sfasamento e l'attenuazione in regime estivo). Molto facile evitare i ponti termici.

Tabella 3.11: Sintesi dei Requisiti Essenziali della CPD e prestazioni tipiche del compensato di tavole.

Come per gli aspetti merceologici, anche in questo caso l'ottimizzazione della progettazione richiede un certo impegno: se a prima vista appare intuitivo poter fare affidamento sulla robustezza e l'elevata inerzia delle sezioni impiegate, non si deve sottovalutare il fatto che non basta "aumentare di un centimetro" una sezione per cogliere tutti i benefici del compensato di tavole. In molte parti di questa pubblicazione sono descritti esempi applicativi e regole di progettazione e calcolo. In questo contesto è comunque utile ricordare alcuni criteri che consentono di impiegare in maniera sinergica le prestazioni complessive del compensato di tavole:

la durabilità non aumenta passando dal legno massiccio o lamellare al pannello, mentre le superfici di contatto (sia con il legno che con altri materiali) sono spesso molto maggiori, quindi tutte le regole di buona progettazione vanno scrupolosamente osservate; anche se l'elevata dimensione dei pannelli certamente suggerisce l'opportunità di progettare elementi portanti grandi, per ottimizzare le prestazioni dei setti e/o i tempi di posa, occorre sempre considerare in alternativa la possibilità di eseguire un numero di giunzioni maggiore, per ottenere una qualità migliore; ciò a volte "paga" anche in termini prestazionali (duttilità, sigillatura, acustica…) oltre che di costi e tempi (trasporto, stoccaggio, sollevamento…); le viti inserite parallelamente alla fibratura ("di testa") hanno una resistenza all'estrazione molto inferiore rispetto a quella delle stesse viti inserite di fianco perciò, può essere previsto nei calcoli, oppure si devono prevenire possibili errori in fase di posa.

Le caratteristiche meccaniche dei pannelli dipendono ovviamente da quelle delle tavole impiegate. La tipologia di gran lunga più diffusa è la C24. Come per il compensato di piallacci, esistono semplici regole di calcolo che consentono di calcolarsi l'intera matrice di valori sulla base di pochi parametri (generalmente densità, resistenza e modulo elastico a flessione nel piano, resistenza e modulo di taglio nel piano e nello spessore). Ovviamente, però, tali formule sono cautelative, per cui alcuni produttori hanno preferito sviluppare la serie completa di prove secondo EN 789, almeno per alcune delle combinazioni più diffuse spessore/composizione. Altra analogia con il compensato: poiché il tipo e la distribuzione di giunzioni di testa e di fianco contribuisce a far variare le caratteristiche meccaniche del pannello finito, occorre controllare che rientrino nei limiti prefissati.
In attesa degli sviluppi normativi, l'approccio più logico per il progettista è considerare un "sistema costruttivo" basato sul compensato di tavole, anziché il singolo prodotto.

SISTEMI COSTRUTTIVI

Il compensato di tavole si è prestato molto bene allo sviluppo di "sistemi costruttivi", definiti in termini precisi da singole aziende e/o associazioni con lo scopo di rimediare alla lacune esistenti nella normativa cogente e volontaria. Gli esempi di tipo associativo più noti sono quelli di STILE21, SOFIE e dataholz.

- **STILE21** [3] è un consorzio costituito per iniziativa di alcuni imprenditori del settore, con lo scopo di sviluppare un nuovo sistema costruttivo, finalizzato al benessere degli utenti, attraverso un protocollo tecnico-prestazionale di eccellenza: elevato comfort termico ed acustico, velocità di costruzione, sicurezza al fuoco e al sisma, durata nel tempo e rispetto dell'ambiente, senza porre vincoli a livello compositivo o di scelta delle finiture.

Il consorzio ha svolto un'approfondita ricerca e sviluppo dei particolari costruttivi, effettua una formazione continua dei collaboratori e un attento controllo della qualità dei materiali impiegati, per il rispetto rigoroso di un Capitolato Prestazionale e di un Manuale Costruttivo convalidati da progettisti indipendenti.
Il *Manuale Costruttivo Stile21*, con circa 90 schede relative a giunti, elementi costruttivi e indicazioni di posa degli impianti, consente di sviluppare ogni edificio in maniera assolutamente libera e rispettosa del progetto architettonico, mantenendolo coerente con il Capitolato Prestazionale del consorzio. Due tabelle sinottiche suggeriscono le combinazioni tipicamente adottate nei macrocontesti di riferimento, a livello sismico e climatico.
Le composizioni degli elementi costruttivi sono ottimizzate per garantire i requisiti prestazionali desiderati, attraverso la collaborazione di fornitori altamente qualificati, l'intervento di professionisti indipendenti che ne curano il costante aggiornamento e il supporto di enti di ricerca che consentono di testare nuove soluzioni e materiali, verificandone le prestazioni. Viene trattata anche la posa degli impianti, perché fondamentale per conservare, all'atto della costruzione, le qualità e le prestazioni progettate. Fornendo indicazioni chiare ai progettisti e agli impiantisti, *Stile21* non intende sostituirsi alla loro professionalità, ma offrire la propria esperienza di specialisti nella carpenteria, per definire assieme la soluzione capace di ottimizzare il risultato finale e raggiungere l'obiettivo desiderato: costruire benessere per gli utenti dell'edificio. Coerentemente con i più recenti requisiti normativi, le aziende del consorzio offrono una garanzia di 50 anni sulla durabilità delle strutture a chi applica correttamente il Manuale di Uso e Manutenzione, fornito alla consegna dell'edificio, o che gli affidano il servizio di manutenzione. *Stile21* ha anche avviato la procedura per ottenere il Certificato di Idoneità Tecnica all'Impiego dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

- **SOFIE** Sistema Costruttivo Fiemme [2] è un progetto di ricerca sull'edilizia sostenibile condotto dall'Istituto IVALSA del Consiglio Nazionale delle Ricerche con il sostegno della Provincia Autonoma di Trento. Sofie ha lo scopo di definire le prestazioni e le potenzialità di un sistema per la costruzione di edifici a più piani, realizzato con struttura portante di legno trentino di qualità certificata e caratterizzato da elevate prestazioni meccaniche e basso consumo energetico, ottimi livelli di sicurezza al fuoco e al sisma, comfort acustico e durabilità nel tempo: il sistema X-LAM (pannelli lamellari di legno massiccio a strati incrociati) di spessore variabile dai 5 ai 30 cm realizzati incollando strati incrociati di tavole di spessore medio di 2 cm. I pannelli vengono tagliati a seconda delle esigenze architettoniche completi di aperture per porte, finestre e vani scala e in seguito issati e collegati tra loro in opera con angolari metallici, chiodi a rilievi tronco-conici e viti autoforanti. I pannelli sono realizzati interamente con legno proveniente dalle foreste della Valle di Fiemme e dalle altre valli del Trentino. In aggiunta, Trentino Sviluppo ha dato inizio al processo di costituzione di "SOFIE VERITAS", società consortile per azioni che dovrà intraprendere iniziative idonee allo sviluppo di un sistema trentino di promozione, valorizzazione ed implementazione del marchio Sofie. La particolarità di questo sistema è di essere stato oggetto di una campagna sperimentale molto estesa, i cui principali risultati sono disponibili sul sito sotto forma di pubblicazioni abbastanza sintetiche ma chiare.

- La banca dati **dataholz.com** [1] contiene, tra l'altro, una serie di schede tecniche sui possibili dettagli costruttivi di compensato di tavole, con molte indicazioni riguardanti la fisica tecnica e gli aspetti ecologici dei materiali e delle soluzioni costruttive proposte. Tutti le indicazioni e i dati disponibili rappresentano lo stato della scienza attuale e si basano sulle normative attualmente in vigore in Austria, che corrispondono, in molti casi ma non in tutti, alle attuali norme europee EN. La versione italiana di dataholz.com è una traduzione integrale e senza modifiche della versione originale in lingua tedesca, quindi è idonea per una applicazione diretta da parte dei progettisti austriaci. Tutte le indicazioni contenute, secondo cui "i documenti tecnici prodotti tramite dataholz.com ed in accordo con essa possono essere usati quali documenti tecnici per l'approvazione da parte delle Autorità di sorveglianza" si riferiscono quindi a tale realtà e non a quella italiana. Tuttavia occorre sottolineare che le indicazioni, le caratteristiche e i dati tecnici contenuti in dataholz.com sono determinati, in buona parte, sulla base di normative europee correnti e forniscono quindi indicazioni di caratteristiche fisiche sotto forma di valori numerici che hanno valore, sia pure in termini generalmente non cogenti, in Europa. Al progettista italiano dataholz.com offre principalmente uno strumento di consultazione e un catalogo di soluzioni costruttive molto vasto, corredato da indicazioni tecniche molto accurate e avanzate. Le indicazioni tecniche fornite, ancorché molto chiare ed utili, non sono sempre necessariamente corrispondenti allo stato attuale di leggi e regolamenti in vigore in Italia.

Anche alcune singole aziende propongono approcci simili, tanto per pannelli incollati che chiodati, con un grado variabile di omologazione ma senza significative valenze ulteriori, come nel caso dei due prodotti che sono già marcati CE, per i quali i contenuti del benestare tecnico europeo non danno certo al progettista delle informazioni aggiuntive, e quindi delle garanzie in più, rispetto a quanto descritto nei tre "sistemi costruttivi" citati.

I pannelli di legno massiccio a strati incrociati sono comunque all'inizio del loro percorso tecnico-commerciale, e saranno quindi progressivamente affinati e ulteriormente diversificati in funzione delle esigenze applicative, beneficiando tra l'altro della favorevole coincidenza di interesse e aspettative, da parte di progettisti e fornitori, su questa gamma di prodotti.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] www.dataholz.com/it
[2] www.progettosofie.it
[3] www.stile21.it
[4] DM 14-01-2008 – "Norme tecniche per le costruzioni".
[5] UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici".
[6] CNR DT 206-2007 - "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno".
[7] UNI EN 13353 – "Pannelli di legno massiccio (SWP) - Requisiti".
[8] UNI EN 324 – "Pannelli a base di legno. Determinazione delle dimensioni dei pannelli. Determinazione di spessore, larghezza e lunghezza".
[9] UNI EN 789 – "Strutture di legno. Metodi di prova. Determinazione di proprietà meccaniche di pannelli a base di legno".
[10] UNI CEN/TS 13354 – "Pannelli di legno massiccio - Qualità dell'incollaggio - Metodi di prova".
[11] UNI EN 13017 – 1" Pannelli di legno massiccio - Classificazione in base all'aspetto delle facce – Parte 1: Conifere".
[12] Direttiva 89/106/CEE – "Direttiva del Consiglio del 21 Dicembre 1988 relativa al ravvicinamento delle disposizioni legislative, regolamentari e amministrative degli Stati Membri concernenti i prodotti da costruzione".

3.5 MATERIALI ACCESSORI

Per progettare correttamente l'isolamento termo-acustico, la tenuta all'aria e la protezione dalle intemperie di un edificio si devono considerare, in maniera sinergica, l'insieme degli accorgimenti costruttivi: scelta dei materiali, forma ed orientamento delle superfici, ombreggiature, ventilazione. L'isolamento, l'inerzia termica e la traspirabilità di tetto e pareti esterne contribuisce inoltre anche a creare un clima più salubre all'interno degli ambienti, ed è legato anche alla natura dei materiali utilizzati.

Rinviando ad altre parti del testo la trattazione degli aspetti architettonici e di fisica tecnica, consideriamo di seguito i principi che sono alla base della scelta dei materiali e del loro impiego nella composizione di un "pacchetto" di copertura o parete dalle caratteristiche desiderate.

ISOLANTI

In passato, lo scarso isolamento dei componenti edilizi lasciava percepire facilmente la formazione di condensa (ad es. suoi vetri) o di muffe (sulle pareti), e si poteva porre rimedio aerando i locali. Oggi, le vetrocamere ben isolate e le pitture murali antimuffa fanno sì che il fenomeno sia molto meno visibile, ma pur sempre presente e dannoso: si nascondono gli effetti, ma per prevenire le cause occorre progettare correttamente.
Per la scelta del tipo e dello spessore dell'isolante, la nostra esperienza suggerisce di puntare su prodotti traspiranti e non eccessivamente igroscopici, aumentando leggermente i valori derivanti dal calcolo ai fini dell'isolamento in regime invernale, dal momento che gli accorgimenti progettuali sufficienti per garantire un corretto isolamento dal freddo non sono necessariamente sufficienti, in varie parti d'Italia, per assicurare anche un buona protezione rispetto al surriscaldamento estivo. In estate il calore proveniente dall'esterno può causare all'interno dei locali un clima sgradevole. Nei giorni a forte irraggiamento, come conseguenza delle oscillazioni di temperatura nelle 24 ore, si muove un'onda di calore che passa attraverso l'involucro esterno verso l'interno. A parità di superfici vetrate ed ombreggiature, che sono i fattori più rilevanti, la capacità di accumulo termico delle coperture, delle pareti e delle componenti interne dell'edificio influisce fortemente sulla temperatura dei locali. Infatti, nel passaggio attraverso i materiali, l'ampiezza dell'onda diminuisce (minore escursione termica) e si sfasa dal punto di vista temporale (ritardo del picco termico). La temperatura dell'aria interna nelle stanze esposte a Sud varia allo stesso modo della temperatura della superficie interna della copertura e della parete perimetrale. Tanto minore è l'escursione termica, tanto migliori saranno le condizioni climatiche all'interno del locale. Lo sfasamento ottimale è, nelle condizioni medie estive Italiane, di 8-10 ore. La capacità di accumulo termico di un "pacchetto" di materiali deve quindi garantire uno sfasamento di tale durata.

Un isolante si sceglie principalmente in base alle sue prestazioni, ovvero:

- La **conduttività termica λ** (W/mK) è la capacità di un materiale di condurre calore. Il λ indica la quantità di calore che fluisce attraverso 1 m^2 di materiale dello spessore di 1 m, con una differenza di temperatura tra interno ed esterno di 1 K. I materiali isolanti hanno tipicamente un λ minore di 0,1 W/mK, da misurare a 10°C e riferire al 90% della produzione. Poiché l'umidità dell'isolante ne aumenta la conduttività, diminuendone quindi l'efficacia, l'igroscopicità del materiale isolante ha una significativa importanza. D'altra parte, una certa igroscopicità significa poter disporre della capacità di tamponare gli sbalzi di umidità che necessariamente si verificano all'interno dell'edificio, per le attività quotidiane (ad es. di bagno e cucina).
- Il **calore specifico c** (J/kgK) indica la capacità d'accumulo del calore di un materiale, ovvero la quantità di calore necessaria per riscaldare di 1 K (grado Kelvin) la massa di 1 kg senza che il materiale si sciolga oppure evapori. Quanto maggiore sarà c, tanto più il materiale sarà in grado di accumulare calore. Il legno ha un'ottima capacità di accumulo, in relazione alla sua limitata massa. Questa caratteristica, anche se molto importante per il calcolo dell'isolamento in regime estivo, viene trascurata dalle norme Europee sugli isolanti.
- La **resistenza alla diffusione del vapore μ** è un valore adimensionale che indica quante volte in meno un certo materiale permette il passaggio di vapore, rispetto ad uno strato d'aria dello stesso spessore. L'aria ha quindi μ = 1, mentre i materiali più traspiranti hanno μ < 10 e quelli con μ > 100 sono già considerati un "freno al vapore". Poiché la quantità di vapore che un materiale lascia passare dipende ovviamente anche dal suo spessore, nella pratica si usano più spesso il valore SD = μ x spessore (in metri), oppure WDD (quantità d'acqua che si diffonde in 24 ore attraverso un materiale, per una differenza di umidità del 50% circa).
- Le **rigidità dinamica R** (MN/m^2) esprime le qualità acustiche dei materiali isolanti quando sono usati come cappotto all'esterno di una parete, oppure come strato anticalpestio in un solaio. A un valore più basso di rigidità corrisponde un comportamento migliore, più smorzante. L'isolante usato come riempimento di un cavedio ha prestazioni acustiche non molto significative, che si valutano attraverso il parametro "resistenza al flusso d'aria", migliore se il valore è più elevato.

Ma anche altri fattori possono essere molto importanti ai fini di una scelta razionale:

- il comportamento reale in caso di incendio. Al di là della "reazione al fuoco" misurata in laboratorio, è noto ad esempio che gli estrusi in polistirene si "ritirano" per effetto del calore creando dei vuoti e quindi un effetto "camino" in certe situazioni, oppure che la fibra di legno può bruciare per combustione senza fiamma, per giorni, portando l'incendio anche molto lontano dal punto d'innesco; invece materiali quali lana, lana minerale, lana di legno mineralizzata o sughero hanno un ottimo comportamento in caso d'incendio (limitata infiammabilità e stabilità dimensionale);
- gli effetti sulla salute di un eventuale rilascio di gas o distacco di fibre e polveri (in fase di cantiere, di esercizio e di incendio), leggendo con attenzione la scheda di sicurezza;
- l'eventuale attitudine a lasciar sviluppare le muffe in caso di aumento dell'umidità;
- la durabilità del materiale rispetto a cicli di gelo/disgelo, temperatura elevata, carichi permanenti e accidentali;
- l'impatto ambientale della preparazione delle materie prime utilizzate e il dispendio di energia necessario per la produzione e il trasporto.

La serie di norme europee da EN 13162 a EN 13171 copre la maggior parte dei prodotti isolanti per edilizia ed ha già reso obbligatoria la marcatura CE. Purtroppo, non tutti i prodotti disponibili sul mercato sono marcati (per alcuni queste norme "non sono applicabili"), né tutti i prodotti marcati dispongono della serie completa di prove che li renderebbero davvero comparabili sul piano prestazionale, perché alcuni produttori dichiarano soltanto i valori relativi ai requisiti *generici* (conduttività o resistenza termica, tolleranze dimensionali, stabilità dimensionale in condizioni standard, reazione al fuoco) e non quelli relativi ai requisiti *specifici* (trasmissione del vapore d'acqua, stabilità dimensionale in condizioni di umidità più elevata, assorbimento d'acqua, resistenza a compressione, proprietà acustiche…). Nella Tabella 3.12 sono riassunte le prestazioni di alcuni isolanti, sulla base dei dati tratti da pubblicazioni, da schede tecniche e da esperienze dirette in varie applicazioni.

Isolante	**MV** (kg/m^3)	λ (W/mK)	**c** (J/kgK)	μ (adim.)	**R** (MN/m^2)	**Altre caratteristiche**
Lana minerale (soffice)	25-150	0,035 ÷ 0,05	840	1-2	15-20	Igroscopica, non combustibile. Fibre e polveri. Durabile.
Fibra di legno in pannelli	130-250	0,04 ÷ 0,06	2.500	5-10	20-40	Molto igroscopica, combustibile. Fibre e polveri. Limitata durabilità.
Fibra di legno (soffice)	35-50	0,038	2.100	1-2	5-10	Molto igroscopica, combustibile. Fibre e polveri. Limitata durabilità.
Lana di legno mineralizzata	350-550	0,07 ÷ 0,09	2.100	2-5	200-300	Poco igroscopica, poco combustibile. Polveri. Imputrescibile.
Sughero espanso	40-60	0,045	1.600	5-10	20	Non igroscopico, poco combustibile. Polveri. Imputrescibile.
Sughero granulare	100 - 130	0,04 ÷ 0,05	1.600	1-2	10-20	Non igroscopico, poco combustibile. Polveri. Imputrescibile.
Sughero agglomerato	100 - 180	0,04 ÷ 0,05	1.800	10-15	40-80	Non igroscopico, poco combustibile. Polveri. Imputrescibile.
Polistirene estruso	25-40	0,025 ÷ 0,04	1.500	80-300	770	Non igrosopico, poco combustibile. Polveri. Imputrescibile.
Cellulosa insufflata	35-80	0,03 ÷ 0,045	1.900	1-2	30-100	Poco igroscopica, poco combustibile. Fibre. Buona durabilità.
Canapa, kenaf (soffice)	20-40	0,04	1.500	1-2	5-10	Molto igroscopica, combustibile. Fibre e polveri. Scarsa durabilità.
Lana (soffice)	20-40	0,04	1.300	1-5	5	Igroscopica, poco combustibile. Fibre e polveri. Buona durabilità.

Tabella 3.12: Caratteristiche tipiche di diversi isolanti, di tipo rigido se non diversamente indicato. Per la scelta occorre comunque riferirsi alle schede tecniche degli specifici prodotti.

MEMBRANE TRASPIRANTI E SIGILLATURA

Mediamente, l'attività di una famiglia tipica (2 adulti + 2 bambini) produce giornalmente una quantità di vapore corrispondente a circa 10 litri d'acqua. Nelle attuali tipologie edilizie, ben isolate, si calcola che circa il 2-20 % del vapore possa essere smaltito per diffusione attraverso le pareti, mentre il restante 98-80 % debba essere

eliminato attraverso il ricambio d'aria (apertura delle finestre, aeratori…), oppure mediante convezione attraverso gli interstizi della struttura (crepe, giunti non sigillati..). Soprattutto in quest'ultimo caso il raffreddamento dell'aria umida può essere repentino, determinando la formazione di condensa all'interno degli elementi strutturali. La tenuta al vento dell'edificio assume forte rilevanza anche dal punto di vista dei consumi e del comfort. Alcune indicazioni di base sulla scelta delle soluzioni costruttive e dei relativi materiali:

- una buona tenuta all'aria e al vento dell'involucro, realizzata con teli o carte permeabili al vapore, è un fattore importante sia per evitare la condensazione per convezione, che per raggiungere i livelli di risparmio energetico calcolati. Una buona tenuta si ottiene curando i dettagli costruttivi ed impiegando idonei materiali di assemblaggio e posa (raccordi, nastri adesivi…);
- il ricambio d'aria è necessario, ma deve essere quello previsto, sia come localizzazione che come entità, per non produrre effetti indesiderati. Un indicatore standard (nL50) è il n° di ricambi/ora dell'edificio sottoposto ad una differenza di pressione esterno/interno pari a 50 Pa. Si consiglia un nL50 compreso tra 2 e 1 (quest'ultimo, negli edifici dotati di impianto automatizzato di ricambio);
- la ventilazione delle falde di copertura e delle pareti, correttamente realizzata, è un elemento importantissimo per lo smaltimento del vapore proveniente dall'interno e dell'acqua che si infiltra sotto il rivestimento;
- i ponti termici debbono essere evitati o limitati;
- per il rivestimento e l'isolamento è utile impiegare materiali igroscopici che garantiscono un effetto tampone rispetto ai picchi di umidità. Tali materiali non debbono ricevere trattamenti superficiali impermeabili, suscettibili di far perdere questa caratteristica.

In funzione delle scelte progettuali e delle varie zone climatiche, sono disponibili molte tipologie di materiali, con varie caratteristiche, e in "gamme" coordinate e quindi compatibili come dimensioni, coefficienti di dilatazione, adesione ecc. Le schede tecniche illustrano l'impiego previsto, normalmente con molta chiarezza. A seconda del carico di umidità, delle condizioni climatiche del sito e della presenza di ventilazione esterna, la permeabilità ottimale di queste membrane può variare: quella esterna deve comunque essere più permeabile rispetto a quella interna, se si vuole favorire lo smaltimento verso l'esterno del vapore (il caso più tipico). La scelta deve essere effettuata anche considerando le caratteristiche di impermeabilità all'acqua liquida, facilità di posa, resistenza e sicurezza al calpestio, resistenza allo strappo, resistenza alle alte temperature (non è difficile raggiungere una temperatura di 80°C sotto il manto di copertura) ed eventualmente ai raggi UV (fasi di posa).

Le tipologie più utilizzate, che assumono varie denominazioni merceologiche, sono

- il **freno al vapore**, che è una membrana traspirante, a permeabilità limitata, che si installa normalmente all'interno dell'isolante per far si che esso non debba risentire degli eccessivi picchi di umidità causati dall'attività domestica (bagno, cucina...),
- la **guaina a diffusione** che si installa all'esterno dell'isolante per proteggerlo dalle sollecitazioni esterne (vento, acqua infiltrata sotto il manto di copertura, polvere, parassiti…).

Nella Tabella 3.13 è riportata una classificazione di massima delle tipologie di membrana, con riferimento ai valori tipicamente riportati nelle schede tecniche: SD = μ x spessore (in metri) e WDD (quantità d'acqua che si diffonde in 24 ore attraverso un materiale, per una differenza di umidità del 50% circa).

Tipologia	Spessore equivalente di diffusione S_D (m)	Permeabilità al vapore W_{DD} (g/m^2 24 h)
Guaina a diffusione	$< 0,2$	> 120
Freno al vapore	$> 0,2$	< 120
Barriera al vapore	> 100	$< 0,24$

Tabella 3.13: Caratteristiche di diverse tipologie di freno al vapore. Per la scelta occorre comunque riferirsi alle schede tecniche degli specifici prodotti.

RIVESTIMENTI A BASE DI LEGNO

L'impiego di rivestimenti a base di legno consente di combinare il soddisfacimento di requisiti estetici anche molto particolari con l'ottenimento di una "pelle" permeabile, igroscopica e coibente per l'edificio. In molti casi, il rivestimento a base di legno è desiderato per il suo aspetto, per la ricchezza di forme e colori che possono essere ottenute con un materiale che è facilmente lavorabile e offre infiniti spunti alla creatività del designer. Quando invece si predilige l'aspetto funzionale e la durabilità, i rivestimenti a base di legno offrono comunque delle buone prestazioni, nonostante l'opinione diffusa, ma non sempre vera, che essi richiedano più manutenzione rispetto a materiali diversi. Inoltre, i rivestimenti a base di legno possono rivelarsi belli e funzionali anche nel loro aspetto mutevole quando siano appositamente lasciati privi di manutenzione: infatti possono sviluppare con la maturazione quella patina superficiale grigia che caratterizza il legno "vissuto" a contatto degli agenti atmosferici, che ne aumenta il fascino senza diminuirne le prestazioni. La grande tradizione dell'impiego del legno sulle superfici esterne ha portato, in varie zone geografiche, a definire una vasta gamma di tipologie

d'impiego, di trattamenti superficiali efficaci e di gradevole aspetto, di dettagli costruttivi efficaci contro l'azione dei fattori di degrado che risulta impossibile descrivere compiutamente nello spazio qui disponibile. Esempi di rivestimenti in legno massiccio (perline, scandole, listelli..) sono visibili in alcune delle immagini riportate in questa pubblicazione e nella Figura 3.12.

Il criterio fondamentale nella scelta della tipologia di rivestimento è la sua stabilità dimensionale rispetto al resto della struttura ed il mantenimento della durabilità in funzione della classe di rischio biologico. I prodotti utilizzabili per ottenere la finitura e la protezione del legno desiderate sono gli stessi impiegati per i serramenti, più alcuni altri specifici.

Figura 3.12: I rivestimenti con perline, scandole e listelli si adattano bene anche all'architettura contemporanea.

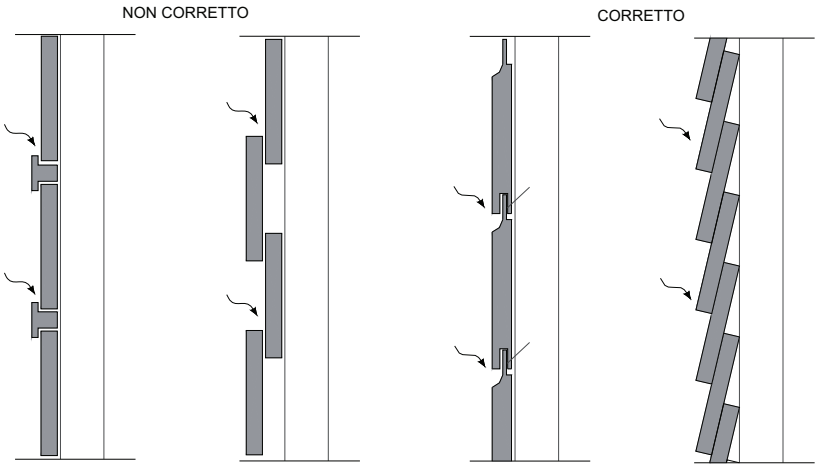


Figura 3.13: Modalità di fissaggio di alcune tipologie di perlinatura, in funzione della prevenzione dell'ingresso di acqua piovana.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] UNI EN 13162 – "Isolanti termici per edilizia – Prodotti di lana minerale ottenuti in fabbrica - Specificazione".
[2] UNI EN 13171 – "Isolanti termici per edilizia – Prodotti di fibre di legno ottenuti in fabbrica - Specificazione".

3.6 QUALIFICAZIONE DI PRODOTTI E PRODUTTORI, MARCATURA CE

La qualificazione di prodotti e produttori sta evolvendo molto positivamente. Il "legno" (materia prima) diventa "legname" (prodotto per uso strutturale) quand'è classificato secondo la resistenza e fornito in cantiere da un produttore o da un centro di lavorazione qualificato. Questo termine, tradizionalmente usato anche in Italia (il Prof. Guglielmo Giordano parlava di "legname da opera") richiama la differenza tra "wood" e "timber" presente nei paesi anglofoni. Ma le parole, anche se importanti, non sono fatti. Consideriamo perciò un evento in corso, molto significativo: la "qualificazione dei fornitori" da parte del Ministero delle Infrastrutture, con l'impegno delle migliori aziende in questa attività ed in quella, complementare, di marcatura CE dei prodotti.
Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" hanno ristabilito la par condicio tra i vari materiali: i progettisti, confrontandoli su base prestazionale, possono scegliere quello più idoneo per ogni specifica applicazione.
In sintesi, il DM 14.09.2005, e il successivo DM 14.01.2008, prescrive:

- ai **fornitori** (produttori e centri di lavorazione) di apporre la marcatura CE applicabile e, in certi casi, anche di iscriversi all'Albo dei Produttori Qualificati presso il Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture. Le Tabella 3.14, Tabella 3.15, Tabella 3.16 descrivono in maniera più dettagliata le prescrizioni attualmente definite, con riferimento alle principali tipologie di azienda, prodotti ed elementi strutturali presenti sul mercato;
- ai **progettisti** di fare i riferimenti corretti alle norme in vigore, anziché a quelle superate o, peggio ancora, a definizioni prive di riferimenti concreti e oggettivi (ad esempio: legno di "prima scelta", in cui non è chiaro se si tratti di prestazioni o di estetica, e neppure si definisce in maniera univoca cosa si desidera);
- al **Direttore dei Lavori** di verificare che il prodotto "legno strutturale" sia oggetto di qualificazione e che la posa segua le "specifiche tecniche del produttore", rifiutando le forniture non conformi;
- al **Collaudatore** di controllare la qualità dei materiali e le certificazioni fornite.

Nel frattempo, l'Eurocodice 5 ha avuto ampia diffusione tramite convegni e testi dedicati [1] e sono state pubblicate le Istruzioni CNR DT206/2007. Il quadro legislativo è quindi completo e operativo. La distinzione tra "prodotti" ed "elementi strutturali" (Tabella 3.14) e la tipologia di attività (Tabella 3.15) determinano il regime di qualificazione applicabile alle varie aziende. Anche la differenza tra **"marcatura CE" del prodotto** e **"qualificazione del produttore"** è ben chiara, e presente anche in vari altri paesi europei: si tratta di attività spesso complementari, solo in certi casi alternative (Tabella 3.16).

A breve, arriveranno i primi **Attestati di Qualificazione** da parte del Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture: i Progettisti dovranno conoscerne il contenuto, mentre i Direttori dei Lavori dovranno anche pretenderne la consegna.
L'aspetto fondamentale per la qualificazione è la capacità dell'azienda di effettuare correttamente la classificazione in base alla resistenza di ogni singolo prodotto (o elemento strutturale), con metodi "a vista" o strumentali. I primi, codificati sulla base di lunghe esperienze e migliaia di prove distruttive, sono più adatti a piccole produzioni, discontinue e variabili come assortimenti. I secondi, recentemente sviluppati sulla base di evidenze sperimentali e statistiche, offrono soluzioni affidabili ed economiche per i processi industriali di grandi serie omogenee. Nella pratica commerciale, la classe di resistenza del legno di conifera viene ancora spesso indicata utilizzando la DIN 4074; è preferibile comunque fare riferimento alle UNI EN 338 e UNI EN 1194, che saranno le sole in vigore dal momento in cui sarà obbligatoria la marcatura CE (settembre 2009 per il massiccio, aprile 2010 per il lamellare). La Tabella 3.17 riporta le corrispondenze. Alcuni fornitori esteri acquistano anche tronchi cresciuti in Italia e classificano tutti i loro segati secondo DIN 4074. Ciò potrebbe apparire formalmente non corretto, ma viene ovviamente tollerato, dal momento che la DIN 4074 non limita il proprio campo di applicazione al solo territorio nazionale tedesco e austriaco e la UNI EN 1912 lo descrive come "Central, North and Eastern Europe", un'areale di crescita abbastanza vasto che, includendo l'arco alpino, non può certo escluderne le porzioni in territorio italiano. Ovviamente, gli Enti notificati di Austria e Germania autorizzano la marcatura CE di legname prodotto con tronchi cresciuti in Italia, in zona alpina. La UNI 11035, preferibile per il legname proveniente da boschi Italiani ma praticamente poco utilizzata a livello commerciale, è in corso di revisione. Le modifiche dovrebbero includere una nuova serie di classi di resistenza coerenti con la UNI EN 338 e regole specifiche per gli assortimenti con forti smussi ("Uso Fiume", "Uso Trieste" e simili) per i quali è in corso di elaborazione un'ampia serie di dati sperimentali. Inoltre, per consentire fin da subito la marcatura CE del legname italiano con riferimento alla UNI 11035 sono state proposte dal CNR-IVALSA le necessarie equivalenze (Tabella 3.17 e Tabella 3.18).

Progettare strutture di legno non è complicato, ma richiede una specifica professionalità che in Italia è andata progressivamente rarefacendosi. Solo la qualità del progetto e della posa possono però garantire efficienza, sicurezza e durabilità. Ogni figura coinvolta nel cantiere (committente, progettista, impresa, fornitori, direttore lavori, collaudatore) ha le proprie specifiche responsabilità e autorità. Quelle del fornitore si concretizzano nell'indicazione delle corrette modalità di posa dei materiali che consegna. In quest'ottica assumono quindi

grande importanza le **specifiche tecniche per la posa in opera** che il DM richiede al fornitore di emettere, perché esse concretizzano la responsabilità e l'autorità del fornitore nei confronti delle altre figure professionali coinvolte. Il direttore lavori potrà anche non accettare tali indicazioni o modificarle, assumendosi però questa responsabilità al posto del fornitore. Le istruzioni di posa dovranno essere commisurate alla tipologia di fornitura, potendo essere anche molto semplici, ma sufficienti a integrare e/o chiarire ciò che non è esplicitamente previsto nel progetto esecutivo.

Come già ricordato **ogni fornitore** (anche estero, se consegna direttamente in cantiere con propria fattura) **dev'essere qualificato dal Servizio Tecnico Centrale** con una delle seguenti modalità:

- come "produttore", se non ha ancora la possibilità di apporre la marcatura CE sui propri prodotti;
- come "centro di lavorazione" se trasforma i prodotti (anche già marcati CE) in elementi strutturali.

E' stato verificato che questo requisito non è in contrasto con la libera circolazione delle merci, ed è presente in forme analoghe in altri paesi.

Elemento fondamentale della qualificazione è l'individuazione di un **Direttore Tecnico della Produzione** che si assume la responsabilità della classificazione in base alla resistenza. In Italia è stata attivata una specifica formazione qualificante (un corso di aggiornamento che attribuisce ai frequentanti anche crediti formativi spendibili in ambiente universitario), all'estero esistono profili professionali equivalenti che potranno essere riconosciuti validi dal Servizio Tecnico Centrale.
Altri requisiti importanti per la qualificazione:

- gestire i prodotti in regime di **rintracciabilità** dalla classificazione alla posa;
- apporre un "**marchio del produttore**" che rimanga inalterabile nel tempo (può coincidere con la marcatura CE ove presente).

Per i prodotti esteri, non cambia niente: in attesa che la marcatura CE sia obbligatoria, molti produttori l'hanno già applicata volontariamente, mentre alcuni fanno pervenire le traduzioni delle loro certificazioni, omologazioni o approvazioni ottenute a livello nazionale. In ogni caso, l'aspetto che il Progettista e/o Direttore dei Lavori deve controllare con attenzione è **la qualità delle informazioni** relativamente ai seguenti aspetti:

- tipologie coperte (specie, dimensioni, lavorazioni…) e termini di validità del documento;
- prestazioni del prodotto (con riferimento ai 6 Requisiti Essenziali della CPD);
- modalità di verifica e realizzazione dei giunti;
- istruzioni per lo stoccaggio in cantiere e la posa in opera;
- modalità di controllo della qualità, identificazione e marcatura.

Purtroppo si sono presentati casi di prodotti, anche ottimi, per i quali queste informazioni sono risultate molto scadenti e/o assenti, obbligando il professionista a richiedere integrazioni (che non sempre sono disponibili) oppure ad assumersi responsabilità che non gli competono. In ogni caso con l'inconveniente (ben che vada) di ritardare l'esecuzione dei lavori.

L'offerta di prodotti sul mercato sta quindi evolvendo, a fronte di un prezzo del legname che è in calo (addirittura quello del lamellare è uguale a 25 anni fa, in termini assoluti). L'affidabilità e la facilità di posa oggi possono fare la differenza, e una struttura in legno può risultare conveniente rispetto ad una in laterocemento, a pari prestazioni. Qualità ed economicità del risultato sono però correlate con l'attenzione dei committenti verso la professionalità e la qualificazione dei loro progettisti e fornitori. I quali sono i primi a dover soddisfare la forte domanda di "cultura del legno" che sta diffondendosi sul mercato, fornendo informazioni di qualità e adottando con prontezza gli schemi di qualificazione e certificazione che sono giustamente richiesti.

Tipologia	Definizione	Esempi (indicativi)
Prodotti in legno per uso strutturale	Manufatti commercializzati per un impiego generico in ambito strutturale, la cui specifica destinazione o funzione in un progetto o in una commessa non è ancora definita al momento della vendita.	Legno massiccio o lamellare venduto senza ancora poter sapere se sarà impiegato come "trave di solaio" o come "puntone di capriata".
Elementi strutturali in legno	Prodotti in legno per uso strutturale a cui, al momento della vendita, sia già assegnata una specifica funzione in un progetto o in una commessa ed eventualmente eseguita una trasformazione.	Travi per solaio; pannelli per parete; capriate; casa in legno; copertura in legno in opera…

Tabella 3.14: Distinzione tra prodotti ed elementi.

Tipologia	Attività svolte	Qualificazione del produttore (1) da parte del Min. delle Infrastrutture
Produttore	Solo segheria e/o produzione di manufatti incollati (senza trasformazione in "elementi strutturali").	Qualificazione non necessaria se i prodotti sono marcati CE. Altrimenti, qualificazione obbligatoria.
Centro di Lavorazione	Esecuzione di lavorazioni sui "prodotti" (taglio, foratura, sezionatura, assemblaggio, impregnazione, montaggio di ferramenta ecc.) in condizioni di stabilimento, per la loro trasformazione in "elementi strutturali".	Qualificazione obbligatoria.
Rivenditore o distributore	Magazzinaggio ed eventuale trasporto di prodotti e/o elementi.	Qualificazione facoltativa (2).
Carpentiere	Lavorazione e posa in opera di "prodotti" o "elementi" (2), in condizioni di cantiere.	Qualificazione facoltativa (3).

(1) = Si definisce "produttore" il soggetto legalmente responsabile della classificazione secondo la resistenza del prodotto o dell'elemento. In assenza di esplicita dichiarazione contraria nei documenti di accompagnamento della fornitura, il produttore coincide con il "fornitore", ovvero il soggetto che effettua la vendita a fronte della quale il materiale entra in cantiere.
(2) = Un rivenditore, distributore o altro soggetto che sia "fornitore" ma non "produttore" può non essere qualificato dal Ministero delle Infrastrutture qualora non si assuma la responsabilità della classificazione in base alla resistenza del materiale che fornisce o lavora.
(3) = Qualora il Carpentiere, con la sua lavorazione, trasforma i "prodotti" in "elementi" fuori dal cantiere (quindi fuori dal controllo del Direttore dei Lavori), la sua attività è assimilabile a quella del Centro di Lavorazione e la qualificazione diviene pertanto obbligatoria.

Tabella 3.15: Organizzazioni commerciali.

Tipologia	Esempi o sigla commerciale	Norma tecnica applicabile	Marcatura CE (1)	Benestare Tecnico (2)	Qualificazione del produttore	CIT
Legno massiccio a sezione rettangolare	A spigolo vivo, "4 fili", refilati....	EN 14081 (*)	Obbligatoria da Settembre 2009	n.a.	(3)	n.a.
Legno lamellare incollato	Vedi definizioni nella norma.	EN 14080 (*)	Obbligatoria da Aprile 2009	n.a.	(3)	n.a.
Pannelli a base di legno compreso il compensato di tavole (5)	Compensati, OSB, pannelli X-lam, truciolari e MDF	EN 13986 (*)	Già obbligatoria (5)	n.a.	(3)	n.a.
Microlamellare	LVL	EN 14374 (*)	Già obbligatoria	n.a.	(3)	n.a.
Sistemi di edifici con struttura in legno a telaio	Edifici tipo "platform frame"	ETAG 007 (*)	Già obbligatoria	Europeo	(3)	n.a.
Travi e colonne in legno composito	Travetti a doppio T (I-beams)	ETAG 011 (*)	Già obbligatoria	Europeo	(3)	n.a.
Sistemi di edifici con struttura di legno a blocchi	Edifici tipo "blockhaus"	ETAG 012 (*)	Già obbligatoria	Europeo	(3)	n.a.
Pannelli portanti a base di legno a rivestimento rinforzato	Pannelli "sandwich"; elementi a "cassone"…	ETAG 019 (*)	Già obbligatoria	Europeo	(3)	n.a.
Legno massiccio con smussi e midollo	Uso Fiume, Uso Trieste e simili.	UNI 11035 (#)	n.a.	Nazionale	Obbligatoria	n.a.
Legno massiccio incollato	KVH, Bilama, Trilama…	EN 385, EN 387 (#)	n.a.	Nazionale	Obbligatoria	n.a.
Altri prodotti o elementi strutturali	Innovativi, o comunque non descritti sopra	nessuna	n.a.	Da sviluppare	Obbligatoria	(4)

(*) = Norma europea armonizzata o ETAG in vigore, prevede le regole per la marcatura CE.
(#) = Norma nazionale (oppure europea non armonizzata), non consente la marcatura CE.
n.a. = non applicabile.
(1) = Il Certificato e la Dichiarazione di Conformità devono essere in lingua Italiana.
(2) = Il Certificato e il testo completo del Benestare Tecnico, compresi gli allegati, devono essere in lingua Italiana.
(3) = Rilasciata dal Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture. Non serve per i prodotti già marcati CE. Obbligatoria per gli elementi basati su prodotti marcati CE, nonché per i prodotti e gli elementi non ancora marcati CE.
(4) = Certificato di Idoneità Tecnica, rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale del Ministero delle Infrastrutture per tutti i prodotti e gli elementi per i quali non sono previste specifiche modalità di qualificazione del produttore.
(5) = la UNI EN 13353, che specifica i requisiti del compensato di tavole, si ferma agli 80 mm. Non è quindi chiaro se tali prodotti siano marcabili CE. Per adesso, circolano con un Benestare Tecnico nazionale.

Tabella 3.16: Tipologie di prodotti ed elementi.

Legno massiccio			Legno lamellare		
DIN 4074	DIN 4074	**UNI EN 338**	DIN 1052	DIN 1052	**UNI EN 1194**
III	S7 – MS7	**C16**	II	BS11	**GL24h – GL24c**
II	S10 – MS10	**C24**	I	BS14	**GL28h – GL28c**
I	S13	**C30**	non prevista	BS16	**GL32h – GL32c**
non prevista	MS13	**C35**	non prevista	BS18	**GL36h – GL36c**

Tabella 3.17: Equivalenza tra le principali classi di resistenza usate in passato e quelle prescritte dalle norme attualmente in vigore (in grassetto).

Specie	UNI 11035	$F_{m,k}$ (MPa)	$E_{0,m}$ (MPa)	ρ_k (kg/m³)	UNI EN 338
Abete nord	S1	29	12000	380	C27
	S2	23	10500	380	C22
	S3	17	9500	380	C16
Abete centro sud	S1	42	11000	280	n. a.
	S2	32	10000	280	n. a.
	S3	26	9500	280	n. a.
Larice nord	S1	42	13000	550	C35
	S2	32	12000	550	C30
	S3	26	11500	550	C24
Douglasia	S1	40	14000	400	C35
	S2/S3	23	12500	420	C22
Altre conifere	S1	33	12300	530	C30
	S2	26	11400	530	C24
	S3	22	10500	530	C22
Castagno	S	28	11000	465	D27 (C27)
Pioppo - ontano	S	26	8000	420	C16
Altre latifoglie	S	27	11500	515	D27 (C27)
Querce	S	42	12000	760	D40

Al fine di un corretto uso della tabella si tenga presente che:
1) attualmente il legname di "Abete centro sud" non risulta assegnabile a nessuna classe della UNI EN 338.
2) Per quanto riguarda i tipi di legname "Castagno" e "Altre latifoglie" si possono considerare dei valori caratteristici ricavabili dalla tabella delle Conifere e Pioppo, in mancanza di profili corri-spondenti nella tabella Latifoglie (prospetto 1 della norma UNI EN 338). Tale estrapolazione ricalca quanto proposto nella norma NF B 52-001 del 2007 a proposito della quercia francese.

Tabella 3.18: Equivalenza tra le categorie della UNI 11035:2033 e le classi della UNI EN 338.

Ambito	**DM 14-01-08 + D.M. II.TT. - 6/5/2008**	**UNI EN 14081-1 e UNI EN 14080 + GNB-CPD SG18 (note integrative)**
Campo di applicazione	Per "produttori": Istanza di qualificazione Per "trasformatori": denuncia di attività Elenco dettagliato di tutti gli elementi in produzione, con indicazione dei principali dati dimensionali caratteristici di ciascuna tipologia	Per produttori: domanda di certificazione a Notified Body Per "trasformatori": non applicabile Va precisato il tipo di prodotti realizzati e le lavorazioni effettuate
Descrizione del sito di produzione	relazione con organigramma, pianta dello stabilimento con le aree relative alle lavorazioni ed i relativi macchinari, firmata dal legale rappresentante e dal DTP	Factory Production Control (simile a ISO 9000, ma senza obiettivi per la qualità e soddisfazione dei clienti), è previsto inoltre il piano di manutenzione degli strumenti e delle macchine
Descrizione del processo di produzione	Relazione illustrativa dei metodi e dei procedimenti costituenti il "sistema di assicurazione della qualità" e di "rintracciabilità nella catena di distribuzione", nonché il "controllo permanente della produzione attraverso adeguate procedure"	Definire le tolleranze dimensionali riferite alle norme europee, inoltre in funzione delle dimensioni saranno definite anche le modalità di sollevamento e trasporto
Ottemperanza alla legge nazionale relativa alla sicurezza	DL 81/2008	Relazione sulla movimentazione, sul sollevamento e montaggio, nonché sul sistema di stoccaggio in stabilimento e sul trasporto

Ambito	**DM 14-01-08 + D.M. II.TT. - 6/5/2008**	**UNI EN 14081-1 e UNI EN 14080 + GNB-CPD SG18 (note integrative)**
Uso esclusivo di legno classificato	Dichiarazione, a firma del legale rappresentante e del DTP, nelle quali si attesti l'impiego esclusivo di prodotti a base di legno, classificati ai sensi della vigente legislazione in materia e qualificati secondo il DM 14.9.95	Stesso obbligo, previsto dalla CPD 89/106
Qualificazione del personale	Nomina del Direttore Tecnico di Produzione, controfirmata dallo stesso per accettazione	Viene nominato un DTP (non necessariamente qualificato dal Ministero) ma anche due ulteriori funzioni professionali che sono il classificatore e il supervisore dell'attività di classificazione
Marcatura e dichiarazione di conformità	Marchio che individua il Produttore e lo specifico Stabilimento, apposto su ogni elemento prodotto, in maniera indelebile e non rimovibile.	Vedi allegati ZA delle norme
Manleva	Dichiarazione che solleva il Servizio Tecnico Centrale da ogni responsabilità per eventuali diritti di terzi sui prodotti in questione	Non previsto
Manutenzione annuale	Inviare annualmente al Servizio Tecnico Centrale, pena la decadenza dell'Attestazione, una documentazione relativa alla permanenza delle condizioni tecniche iniziali e ai risultati dei controlli interni eseguiti nel corso dell'anno.	Visita ispettiva annuale da parte di un Notified Body

Tabella 3.19: Confronto dei contenuti della qualificazione presso il Ministero delle infrastrutture e la marcatura CE.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Lavisci P. (2006), *La progettazione delle strutture di legno,* IlSole24Ore, Milano.
[2] Piazza, Tomasi, Modena (2005), *Strutture di legno*, Hoepli, Milano.
[3] DM 14.09.2005 – "Norme tecniche per le costruzioni".
[4] DM 14.01.2008– "Norme tecniche per le costruzioni".
[5] D.M. II.TT. - 6/5/2008 "Integrazioni al decreto 14 gennaio 2008 di approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni".
[6] EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici".
[7] CNR DT206/2007 "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno".
[8] DIN 4074 – „Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit „.
[9] UNI EN 338 – "Legno strutturale - Classi di resistenza".
[10] UNI EN 1194 - "Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici".
[11] UNI EN 1912 – "Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie e specie legnose".
[12] UNI 11035 – "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale"

Capitolo 4

Riferimenti normativi e aspetti legati alla progettazione

4.1 PREMESSA: IL QUADRO NORMATIVO PASSATO, ATTUALE E FUTURO

Le normative per le costruzioni costituiscono una interessante chiave di lettura per capire il livello di considerazione e di cultura presente in un determinato paese riguardo ai diversi materiali da costruzione. Il caso del legno strutturale in Italia è da questo punto di vista particolarmente significativo.
Per secoli nel nostro paese l'arte di costruire era anche l'arte di costruire con il legno (basta alzare gli occhi e guardare le coperture delle nostre chiese) e il mestiere di carpentiere non poteva prescindere dalle necessarie conoscenze sulle caratteristiche intrinseche e sulla lavorazione di questo che è stato uno dei primi materiali da costruzione utilizzati dall'uomo.
La prima norma sismica mai pubblicata in Italia, il Regio Decreto 18 aprile 1909, prevedeva tra i sistemi costruttivi consentiti per le nuove costruzioni la *muratura animata* (nota anche come muratura baraccata), usata in Calabria sin dalla fine del 1700 proprio come "sistema antisismico" efficace contro i terremoti. Questo sistema consisteva nella realizzazione di edifici a più piani con pareti costituite da intelaiature formate da elementi verticali, orizzontali e diagonali di legno, riempite con porzioni di muratura. La muratura baraccata era inoltre l'unica soluzione ammessa all'epoca per la realizzazione di edifici multipiano.
Tuttavia progressivamente questo patrimonio di conoscenze è andato perduto, principalmente a causa di:

- alcuni errati convincimenti (ad es. che i problemi di degradamento derivino solo dalle proprietà del materiale usato, quando invece è evidente che le cause sono da imputare soprattutto all'adozione di soluzioni costruttive non adatte o dalla confusione fra l'indubbia combustibilità del legno e una presunta spiccata vulnerabilità all'incendio, mentre è dimostrato che le strutture di legno hanno un comportamento a riguardo persino migliore rispetto a quello di altri materiali non combustibili e che la scelta di una struttura di legno non comporta un minor livello di affidabilità);
- una eccessiva fiducia nel fatto che lo sviluppo tecnologico-industriale di materiali quali il cemento armato e l'acciaio li rendesse più affidabili, indipendentemente dalla qualità del progetto e della posa.

Di riflesso anche le università italiane si sono progressivamente adeguate. Il vecchio corso di Costruzioni in Legno, Acciaio e Cemento Armato insegnato nelle facoltà di Ingegneria è andato scomparendo, sostituito dal corso di Tecnica delle Costruzioni in cui il legno è stato rimpiazzato dal cemento armato precompresso. Ancora oggi, nel 2008, l'unica facoltà di Ingegneria in Italia ad avere un corso permanente di Costruzioni in Legno è quella di Trento.
Non è una sorpresa pertanto che per quasi un secolo in Italia il legno sia andato progressivamente scomparendo come materiale da costruzione, sia dal bagaglio di conoscenze di tecnici e maestranze che dal patrimonio architettonico e culturale del nostro paese, oltre che, di conseguenza, dal panorama normativo.
Tuttavia, grazie all'ostinazione di alcuni operatori e al nuovo impulso dato al mondo delle costruzioni in legno dall'innovazione tecnologica derivante dal legno lamellare a partire dagli anni 70, sono pervenute numerose interrogazioni al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sull'ammissibilità dell'utilizzo del legno come materiale da costruzione e sulle normative da applicare. Questi si è più volte espresso sulla possibilità di progettare strutture di legno, in assenza di specifica normativa nazionale, utilizzando "norme di comprovata validità" come le DIN tedesche o le corrispondenti norme Svizzere o Francesi, ma anche e soprattutto l'Eurocodice 5, ossia la normativa europea per la progettazione delle strutture di legno (la cui prima versione sperimentale ha visto la luce nel 1997 e che nel 2004 è giunta alla sua attuale stesura), che in pratica rappresenta la "summa" delle norme nazionali dei vari Paesi europei.

La battaglia per avere una norma italiana, dopo varie vicissitudini (nel 1999 è stata nominata una commissione per la redazione della "Norma Italiana per le Costruzioni in Legno", acronimo N.I.Co.Le., che è stata poi effettivamente scritta salvo finire "dimenticata" in qualche cassetto del Ministero dei Lavori Pubblici, evidentemente a causa di qualche resistenza all'utilizzo del legno come materiale da costruzione) ha visto finalmente un primo successo nel 2005, con la contemporanea emanazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 di aggiornamento della precedente 3274/2003, contenente il Capitolo 9 relativo alle regole specifiche di progettazione degli edifici con struttura di legno nei confronti delle azioni sismiche, e delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" che contenevano ben tre paragrafi dedicati alle strutture di legno.

La prima versione delle norme tecniche era però fortemente lacunosa, non essendo di fatto applicabile da sola per la progettazione ed essendo in alcune parti in aperto contrasto con gli altri documenti normativi a cui esse stesse facevano riferimento per la progettazione (Eurocodici). Tra l'altro tali lacune e incongruenze erano presenti in svariate altre parti delle norme in riferimento agli altri materiali.
Finalmente però tra il 2007 e il 2008 si è avuto un miglioramento decisivo, che dopo tanti anni ha consentito di riportare il legno ad una pari dignità rispetto agli altri materiali da costruzione, anche se qualche piccolo ostacolo continua a permanere.
Con il DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" di aggiornamento del DM 14/09/2005 sono state emanate le nuove norme tecniche, che costituiscono un netto miglioramento rispetto alla versione precedente, in quanto contengono tre paragrafi relativi alla progettazione di strutture di legno:

- il paragrafo 4.4 "Costruzioni di legno" all'interno del Capitolo 4 "Costruzioni civili e industriali";
- il paragrafo 7.7 "Costruzioni di legno" all'interno del Capitolo 7 "Progettazioni per azioni sismiche";
- il paragrafo 11.7 "Materiali e prodotti a base di legno" all'interno del Capitolo 11 "Materiali e prodotti per uso strutturale".

Inoltre hanno già superato la fase di inchiesta pubblica le CNR DT 206/2007 "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno" (il documento è scaricabile all'indirizzo www.cnr.it/sitocnr/IICNR/Attivita/NormazioneeCertificazione/NormazioneeCertificazione.html) applicative per le strutture di legno, che contengono tutte le formule di calcolo e di verifica non presenti nelle Norme Tecniche. Le Istruzioni sono state redatte sulla falsariga dell'Eurocodice 5 (e della mai promulgata NICoLe) e costituiscono uno di quei documenti applicativi di corredo alle Norme Tecniche citati nel Capitolo 12 "Riferimenti Tecnici".

Le Norme Tecniche hanno avuto un iter approvativo piuttosto travagliato, proprio "a causa" delle strutture di legno. Infatti nella versione in corso di approvazione che già circolava nel Dicembre 2007, pur considerando i miglioramenti rispetto al decreto del 2005, permaneva ancora qualche diffidenza nei confronti del materiale legno. In particolar modo i valori dei coefficienti di sicurezza sul materiale erano fortemente penalizzati sia rispetto ai valori utilizzati nel resto d'Europa e del mondo, sia rispetto ai corrispondenti valori relativi agli altri materiali da costruzione. Questa ingiusta penalizzazione, che è stata informalmente giustificata come misura per tutelarsi dalla mancanza di esperienza nella progettazione e realizzazione di strutture con questo materiale "innovativo" per il nostro paese da parte di tecnici e costruttori, ha provocato l'intervento dell'Austria che ha fatto pervenire alle nostre autorità competenti un parere circostanziato di critica delle misure in corso di approvazione, secondo il quale avrebbero costituito un ostacolo alla libera circolazione dei servizi all'interno del mercato comune europeo.

A seguito di tale intervento, le Norme Tecniche sono state ugualmente approvate nel Gennaio 2008 stralciando le tabelle relative ai coefficienti di sicurezza sul legno. Infine con il Decreto del Ministero Infrastrutture e Trasporti del 6/5/2008 "Integrazioni al decreto 14 gennaio 2008 di approvazione delle nuove Norme tecniche per le costruzioni" pubblicato nella GU n. 153 del 02/07/2008 è stato deciso di approvare le tabelle già presenti nella bozza del Dicembre 2007 che, pur penalizzando il legno rispetto agli altri materiali, ne consentono comunque l'utilizzo a pieno titolo anche nel nostro paese.
L'intervento dell'Austria, pur apprezzabile e condivisibile nelle intenzioni, ha di fatto causato un ritardo di 6 mesi alla completa pubblicazione delle norme relative al legno con conseguenti danni per gli operatori del settore.
In ogni caso la strada è tracciata e verosimilmente, passato qualche anno e dimenticate le iniziali diffidenze, cadranno anche gli ultimi ostacoli che ancora penalizzano l'utilizzo del legno nel nostro paese, consentendo un sicuro sviluppo del mercato dell'edilizia in legno.

Continua a rimanere possibile fino al 30 Giugno 2010, (al momento della stesura di questo testo è in corso di approvazione in parlamento il D.L. n. 207/08, il famigerato decreto "milleproroghe" che proroga ulteriormente il termine, precedentemente previsto per il 30 Giugno 2009, in virtù dell'art. 20 del D.L. n. 248/07) l'applicazione delle norme previgenti al DM 2008, in particolar modo i DM del 9 e 16/01/1996. È però improbabile che oltre tale data la stessa proroga (che in realtà dura già da alcuni anni) venga ulteriormente protratta e, in ogni caso, per le strutture di legno è comunque preferibile applicare le norme attuali, contenendo le norme precedenti solo pochi e talvolta errati riferimenti.

Parallelamente è possibile utilizzare gli Eurocodici, ossia i documenti normativi europei per la progettazione strutturale che, secondo una direttiva della Comunità Europea, dal 2010 dovranno coesistere con le varie normative nazionali degli stati membri e potranno essere utilizzati al pari di queste ultime, considerando che i coefficienti di sicurezza dovranno essere comunque stabiliti dalle autorità nazionali.
L'Eurocodice 5 è tra l'altro attualmente il documento normativo esistente più completo per la progettazione delle strutture di legno e il suo utilizzo e applicazione (salvo per i valori dei coefficienti di sicurezza che vanno comunque presi dal DM 14/01/2008) non va in contrasto con le succitate Norme Tecniche.

In Tabella 4.1 viene riportato un quadro riassuntivo delle norme attualmente utilizzabili per la progettazione delle strutture di legno. I DM '96 sismico e sui carichi non sono citati in quanto, come già detto, in vigore solo fino a giugno 2010.

PROGETTAZIONE PER COMBINAZIONI FONDAMENTALI (SLU e SLE)		
Azioni	**Regole di progettazione e verifica**	**Resistenze**
-DM 14/01/2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni, Capp. 2 e 3 oppure *-EN 1990 - Eurocodice. Criteri generali di progettazione strutturale, e EN 1991-1 - Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture (suddiviso in 5 parti)*, ove non in contrasto con il DM 2008 ossia garantendo gli stessi livelli di sicurezza	*-DM 14/01/2008 – § 4.4* (principi generali e coefficienti di sicurezza) + *CNR DT 206/2007* (regole di progettazione e verifica) oppure *-DM 14/01/2008 – § 4.4* (principi generali e coefficienti di sicurezza) + *EN 1995-1-1 Eurocodice 5* (regole di progettazione e verifica)	Legno massiccio: *UNI EN 338: Legno strutturale - Classi di resistenza* + *UNI EN 1912: Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie visuali e delle specie* per specie legnose europee e *UNI 11035: Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale italiani* per le specie legnose di provenienza italiana. Legno lamellare: *UNI EN 1194: Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici* Per gli altri prodotti a base di legno, qualora non esista un norma europea specifica contenente i valori caratteristici, ci si può riferire ai valori forniti dal produttore purché ricavati in conformità alle metodologie di prova stabilite dalle pertinenti norme europee.
PROGETTAZIONE PER COMBINAZIONI SISMICHE (SLU)		
Azione sismica	**Regole di progettazione e verifica**	**Resistenze**
-DM 14/01/2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni, Capp. 2 e 3	*-DM 14/01/2008 – § 7.7* (regole costruttive e di progettazione, valori del fattore di struttura) oppure *- EN 1998-1 Capitolo 8 – Cap. 7* (regole costruttive e di progettazione, valori del fattore di struttura)	Come sopra
PROGETTAZIONE NEI CONFRONTI DELL'INCENDIO (SLU)		
Azioni	**Regole di progettazione e verifica**	**Resistenze**
-DM 14/01/2008 - Norme Tecniche per le Costruzioni, Capp. 2 e 3 *-EN 1990 - Eurocodice. Criteri generali di progettazione strutturale*, e *EN 1991-2 - Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture*, ove non in contrasto con il DM 2008 ossia garantendo gli stessi livelli di sicurezza	*-EN 1995-1-2 Eurocodice 5* (regole di progettazione e verifica) *- CNR DT 206/2007 (cenni)*	Come sopra

Tabella 4.1 – Norme vigenti sulla progettazione delle strutture di legno.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Regio Decreto 18 aprile 1909 n°193.
[2] D.M. II.TT. - 14/09/2005 - "Norme tecniche per le costruzioni".
[3] CNR DT 206/2007 "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno".
[4] D.M. II.TT. - 14/01/2008 "Norme tecniche per le costruzioni".
[5] D.M. II.TT - 6/5/2008 "Integrazioni al decreto 14 gennaio 2008 di approvazione delle nuove Norme tecniche per le costruzioni".
[6] UNI EN 1990: Eurocodice - Criteri generali di progettazione strutturale.
[7] UNI EN 1991-1: Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture.
[8] UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici.

[9] UNI EN 1995-1-2: Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio.
[10] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici.
[11] UNI EN 338: Legno strutturale - Classi di resistenza.
[12] UNI EN 1912: Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie visuali e delle specie.
[13] UNI EN 1194: Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici.
[14] UNI 11035: Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale.
[15] D.M. Min. LL. PP. 9/01/1996 – "Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche".
[16] D.M. Min. LL. PP. 16/01/1996 – "Norme tecniche per le costruzioni in zona sismica".

4.2 LA SITUAZIONE IN ITALIA: NORME TECNICHE E ISTRUZIONI CNR

Come visto nel paragrafo precedente, dopo tanti anni di attesa, il tecnico progettista italiano che si trovi a dover progettare un edificio di legno dispone di strumenti normativi magari perfettibili, ma pienamente applicabili.
Con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni, anche per le strutture di legno, così come per tutte le altre opere di ingegneria civile regolamentate dalle stesse norme, è previsto il collaudo statico in conformità a quanto prescritto nel Capitolo 9.
Pertanto le stesse norme definiscono per i materiali e prodotti strutturali a base di legno, come per gli altri materiali da costruzione, requisiti e modalità operative affinché:

- il progettista possa effettuare la prescrizione di materiali e prodotti a base di legno "strutturali" ovvero classificati secondo la resistenza;
- i produttori/fornitori di tali elementi strutturali siano qualificati dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- il direttore dei lavori, che deve accettare soltanto elementi strutturali forniti da produttori qualificati dal Servizio Tecnico Centrale, abbia una informazione chiara ed esaustiva sui prodotti strutturali a base di legno, sulle procedure di qualificazione e sulla loro rintracciabilità.

DM 14/01/2008 "NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI"

Le Norme Tecniche per le Costruzioni definiscono i principi da adottare per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni nei riguardi delle prestazioni richieste in termini di resistenza meccanica e stabilità, anche in caso di incendio, e di durabilità secondo il metodo semiprobabilistico agli Stati Limite.
Sono delle norme di carattere "prestazionale", come tutte le normative moderne, ossia si prefiggono gli obiettivi, cioè i livelli di sicurezza da raggiungere, mentre sui metodi utilizzati per raggiungere tali obiettivi si lascia, nell'ambito del metodo di calcolo agli stati limite, libertà di scelta al progettista il quale, ovviamente, dovrà giustificare in modo adeguato le scelte operate.
Nelle Norme Tecniche sono definiti i criteri di sicurezza, le azioni da utilizzare nella progettazione, le caratteristiche dei materiali e tutto ciò che riguarda la sicurezza strutturale delle opere. Già nell'introduzione viene specificato che per quel che riguarda le indicazioni applicative, ovvero i criteri di progettazione e verifica delle strutture "*per quanto non espressamente specificato nel presente documento, ci si può riferire a normative di comprovata validità e ad altri documenti tecnici elencati nel Cap. 12*". Ossia il loro utilizzo può (e nel caso delle strutture di legno *deve*) essere accompagnato da altre normative o documenti tecnici che contengano ciò che nelle Norme Tecniche manca, ossia le formule di progettazione e verifica. E, nella stessa introduzione, viene fatto esplicito riferimento agli Eurocodici e, nel citato Cap. 12 contenente i riferimenti tecnici, alle Istruzioni CNR.
Per le strutture di legno sono applicabili insieme al successivo Decreto del Ministero Infrastrutture e Trasporti del 6/5/2008 "Integrazioni al decreto 14 gennaio 2008 di approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" pubblicato nella GU n. 153 del 02/07/2008 contenente i valori dei coefficienti di sicurezza per il legno (sulle spiegazioni del perché per il legno siano stati necessari due decreti si veda quanto scritto in §4.1).

Le Norme Tecniche per le Costruzioni contengono tre paragrafi relativi alla progettazione di strutture di legno:

- il paragrafo 4.4 "Costruzioni di legno" all'interno del Capitolo 4 "Costruzioni civili e industriali" che definisce i requisiti generali e le metodologie di valutazione della sicurezza in termini di resistenza, stabilità, funzionalità, robustezza e durabilità per le costruzioni di legno secondo il metodo degli Stati Limite ;
- il paragrafo 7.7 "Costruzioni di legno" all'interno del Capitolo 7 "Progettazioni per azioni sismiche" definisce le tipologie strutturali ammesse e le corrispondenti classi di duttilità oltre alle prescrizioni aggiuntive per le costruzioni di legno in riferimento alla progettazione nei confronti delle azioni sismiche;
- il paragrafo 11.7 "Materiali e prodotti a base di legno" all'interno del Capitolo 11 "Materiali e prodotti per uso strutturale" definisce le proprietà dei materiali e prodotti strutturali da base di legno e le relative procedure per la loro qualificazione.

Il paragrafo 4.4 "Costruzioni di legno"

In questo paragrafo vengono definiti i principi generali per la progettazione di strutture portanti realizzate con legno strutturale (intendendo con questa terminologia il legno massiccio segato, squadrato o tondo) o con prodotti a base di legno (ossia legno lamellare incollato e pannelli a base di legno) assemblate con mezzi di unione meccanici o mediante incollaggio, in cui sia i materiali che i prodotti rispondano ai requisiti di qualificazione indicati nel successivo paragrafo 11.7.
Tali principi possono essere applicati sia per la progettazione di strutture di nuova edificazione che per la valutazione della sicurezza di strutture esistenti, ovviamente purché si provveda per queste ultime ad una corretta valutazione delle caratteristiche del materiale con riferimento, in particolare, agli eventuali stati di degrado.

Il paragrafo definisce i metodi di analisi strutturale, nell'ambito del metodo semiprobabilistico agli Stati Limite, e le ipotesi di base. Per le ipotesi e i metodi di calcolo si rimanda al §4.5 "Principi di progettazione delle strutture di legno". Inoltre è presente la definizione dei valori dei coefficienti di sicurezza del materiale da adottare per le verifiche agli Stati Limite Ultimi (SLU), i cui valori sono stati poi successivamente confermati nel già citato DM del 6/5/2008.
Il suo utilizzo deve essere necessariamente accompagnato o dall'Eurocodice 5 (espressamente citato in alcuni punti) o da pertinenti istruzioni per il calcolo (si vedano le istruzioni CNR/DT 206 più avanti). Le azioni devono essere definite in accordo con quanto specificato nei Capitoli 2 e 3 delle stesse Norme Tecniche.

Vengono inoltre definite in questo paragrafo le prescrizioni da adottare nelle scelte progettuali in riferimento al soddisfacimento del requisito di robustezza nei confronti di azioni eccezionali, definito nelle Norme Tecniche al §2.1 e al §3.1.1, ossia la capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità delle cause innescanti quali incendio, esplosioni, urti.

In particolare viene suggerita:

- la protezione della struttura e dei suoi elementi componenti nei confronti dell'umidità;
- l'utilizzazione di mezzi di collegamento intrinsecamente duttili o di sistemi di collegamento a comportamento duttile;
- l'utilizzazione di elementi composti a comportamento globalmente duttile;
- la limitazione delle zone di materiale legnoso sollecitate a trazione perpendicolarmente alla fibratura, soprattutto nei casi in cui tali stati di sollecitazione si accompagnino a tensioni tangenziali (come nel caso degli intagli) e, in genere, quando siano da prevedere elevati gradienti di umidità nell'elemento durante la sua vita utile.

Da sottolineare infine che per quanto riguarda la progettazione nei confronti dell'incendio si dice (giustamente) di fare riferimento al documento normativo più completo in questo senso, ossia la parte 1-2 dell'Eurocodice 5 (EN 1995-1-2: 2004) utilizzando il valore del coefficiente parziale di sicurezza per il materiale γ_M relativo alle combinazioni eccezionali.

Il paragrafo 7.7 "Costruzioni di legno"

Il paragrafo 7.7 contenuto all'interno del Capitolo 7 "Progettazioni per azioni sismiche", definisce le regole aggiuntive per la progettazione delle strutture di legno nei confronti delle azioni sismiche ed è la pressoché fedele traduzione del corrispondente capitolo dell'Eurocodice 8 relativo alla progettazione delle strutture nei confronti delle azioni sismiche.
L'azione sismica deve comunque essere valutata secondo quanto specificato nel §3.2 delle Norme Tecniche e deve essere garantito il rispetto degli stati limite ultimi e di esercizio secondo quanto definito nel §3.1.
Le regole del paragrafo 7.7 integrano quelle già presenti per la progettazione agli SLU delle strutture per le combinazioni fondamentali e contenuti nei documenti normativi citati come riferimento dalle Norme Tecniche, ossia l'Eurocodice 5 o le CNR-DT 206. L'osservanza delle indicazioni presenti in questa parte (composta di sole 5 pagine) non basta pertanto di per sé a garantire una corretta progettazione nei confronti delle azioni sismiche poiché è indispensabile che prima di tutto vengano rispettate le regole già presenti nei documenti normativi citati.
Ad esempio: nel caso in cui si intenda progettare, per una struttura di legno, un giunto con elementi meccanici di collegamento a gambo cilindrico (ad es. un giunto pilastro-trave con bulloni e spinotti in un edificio di legno intelaiato), nella progettazione del giunto occorrerà prima di tutto rispettare le indicazioni presenti nelle CNR-DT 206 o nell'Eurocodice 5 relative alle distanze minime degli elementi di collegamento fra loro e dai bordi degli elementi lignei - sia parallelamente che ortogonalmente alla fibratura. Considerando un'unione legno-legno a doppia sezione resistente, si potranno applicare le formule di Johansen per il calcolo della resistenza a taglio del giunto, che poi si riferiscono alle modalità di rottura illustrate in g,h,j,k.
I modi di rottura illustrati si riferiscono a giunti dotati di valori crescenti di duttilità (ossia la capacità di un elemento strutturale di sviluppare deformazioni in campo plastico senza una sostanziale riduzione della capacità resistente, misurata dal rapporto fra la deformazione ultima e la deformazione al limite elastico): facendo riferimento al caso di unione a doppia sezione resistente, si parte dalle rotture in cui il perno è molto rigido e la rottura del giunto avviene per solo rifollamento del legno (ossia schiacciamento localizzato delle fibre legnose per effetto del carico concentrato del connettore sulle pareti del foro di alloggiamento) nei legni esterni (g) o in quello interno (h), per passare alla rottura j in cui, oltre al rifollamento nel legno, inizia la plasticizzazione del perno metallico ma solo nel legno interno, per arrivare al modo di rottura k in cui sia sul legno interno che su quelli esterni si verifica sia la plasticizzazione del perno metallico che il rifollamento del legno. Quest'ultimo rappresenta il modo di rottura più duttile, e quindi quello più indicato in zona sismica, in quanto maggiormente dotato di capacità dissipative di energia.

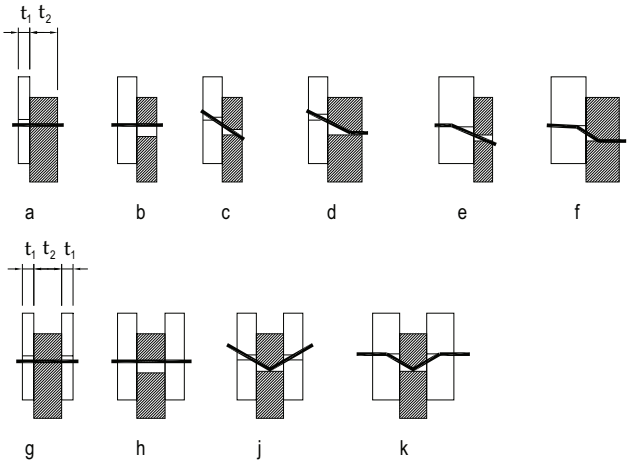


Figura 4.1: Modi di rottura per unioni legno-legno e pannello-legno a singola (a-f) e doppia (g-k) sezione resistente secondo la teoria di Johansen per il calcolo della capacità portante a taglio di mezzi di unione a gambo cilindrico proposte dall'Eurocodice 5 e dalle CNR DT/206.

Quindi, la sola osservanza delle regole contenute nell'Eurocodice 5 o nelle CNR DT/206 fa sì che il giunto sia dotato, in funzione della sua configurazione (diametro del perno in funzione dello spessore delle membrature), in misura minore (modi di rottura g o h) o maggiore (modi di rottura j e k) di una certo livello di duttilità.
A integrazione di queste regole, al sottoparagrafo 7.7.3 "Tipologie strutturali e fattori di struttura", si prescrive che al fine di garantire il comportamento duttile della struttura si devono rispettare le seguenti regole:

a) i collegamenti legno-legno o legno-acciaio sono realizzati con perni o con chiodi presentanti diametro *d* non maggiore di 12 mm ed uno spessore delle membrature lignee collegate non minore di 10d;
b) nelle pareti e nei diaframmi con telaio in legno, il materiale di rivestimento strutturale è di legno o di materiale da esso derivato, con uno spessore minimo pari a 4*d* e con diametro d dei chiodi non superiore a 3,1 mm.

In altri termini, per evitare l'esecuzione di prove specifiche e per garantire un comportamento duttile e dissipativo del giunto, favorendo un modo di rottura del tipo j o k (o d, e o f nel caso di unioni a semplice sezione resistente) occorre limitare il diametro massimo del perno (o chiodo) e garantire un adeguato spessore degli elementi da unire in modo da assicurare sia la formazione di cerniere plastiche nel perno, sia il rifollamento del legno.

Nel paragrafo 7.7 sono definite anche le tipologie strutturali ammesse in zona sismica ed i corrispondenti valori del fattore di struttura q, ossia del fattore da utilizzare nella progettazione per ridurre le forze ottenute da un'analisi lineare tenendo conto della risposta non lineare della struttura in funzione del materiale, del sistema strutturale e del procedimento di progettazione adottato (si veda a proposito §4.7) dividendo, come per gli altri materiali, le tipologie strutturali ammesse in due classi di duttilità, le strutture aventi una bassa capacità di dissipazione energetica (Classe B e valori di q compresi fra 2 e 2,5) e le strutture aventi una alta capacità di dissipazione energetica (Classe A e valori di q compresi fra 3 e 5).
Le Norme Tecniche ammettono anche la progettazione delle strutture nell'ipotesi di comportamento scarsamente dissipativo, per le quali il fattore di struttura q assumerà il valore 1,5.

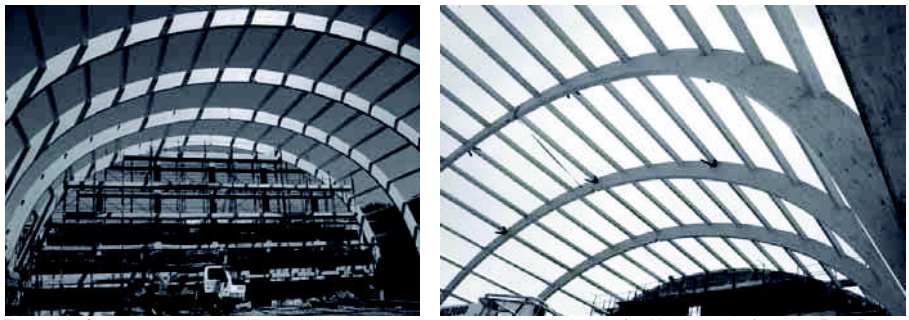


Figura 4.2: Struttura progettata nell'ipotesi di comportamento scarsamente dissipativo (archi a 3 cerniere), q=1,5. Foto Franco Mori.

Classe		q	Esempi di strutture
A	Strutture aventi una alta capacità di dissipazione energetica	3,0	Pannelli di parete chiodati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni; strutture reticolari con giunti chiodati
		4,0	Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del §7.7.3)
		5,0	Pannelli di parete chiodati con diaframmi chiodati, collegati mediante chiodi e bulloni
B	Strutture aventi una bassa capacità di dissipazione energetica	2,0	Pannelli di parete incollati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni; strutture reticolari con collegamenti a mezzo di bulloni o spinotti; strutture cosiddette miste, ovvero con intelaiatura (sismoresistente) in legno e tamponature non portanti Portali isostatici con giunti con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del §7.7.3)
		2,5	Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del §7.7.3)

Tabella 4.2: Tipologie strutturali e fattori di struttura massimi q per le classi di duttilità.

Classe B - Strutture con una bassa capacità di dissipazione energetica

Strutture a portali e telai iperstatici con connessioni realizzate mediante spinotti o bulloni (q=2,5)

Classe A - Strutture con una alta capacità di dissipazione energetica

Edifici con pareti e solai con rivestimento strutturale realizzato mediante pannelli a base di legno chiodati alla struttura, connessi fra loro mediante chiodi e bulloni (q=5)

Figura 4.3: Esempi di tipologie di strutture secondo il paragrafo 7.7 delle Norme Tecniche.

Nelle zone considerate come dissipative possono essere utilizzati solamente materiali e mezzi di unione che garantiscano un adeguato comportamento oligociclico, ossia sostanzialmente unioni meccaniche o comunque unioni la cui reale capacità dissipativa venga dimostrata mediante procedure di prova stabilite in apposite norme (es. EN 12512 "Strutture di legno – Metodi di prova – Prove cicliche su giunti realizzati con connettori meccanici"). Nel caso di progettazione con comportamento strutturale dissipativo è ammesso utilizzare nodi di carpenteria quando questi possono garantire una sufficiente dissipazione energetica, senza presentare rischi di rottura fragile per taglio o per trazione ortogonale alla fibratura, e con la presenza di dispositivi atti ad evitarne la sconnessione.

Le unioni incollate devono invece essere considerate in generale come non dissipative.

I valori di resistenza degli elementi di legno fanno riferimento a carichi di tipo "istantaneo", nelle condizioni di servizio assunte per la struttura. Ai coefficienti parziali di sicurezza sui materiali γ_M si attribuiscono i valori per le combinazioni fondamentali.

Le disposizioni costruttive e le regole di dettaglio per i collegamenti e per gli impalcati sono poche e comunque riferite per la maggior parte dei casi a edifici del tipo Platform Frame. Da questo punto di vista e anche per altri aspetti, questo paragrafo richiederebbe un aggiornamento per riportarlo in linea con i progressi scientifici e tecnologici attuali. Si vedano a questo proposito le osservazioni riportate in §4.3 sul corrispondente capitolo 8 dell'Eurocodice 8.

Il paragrafo 11.7 "Materiali e prodotti a base di legno"

Questo paragrafo è, relativamente al materiale strutturale legno, il più importante dei tre finora citati in quanto fornisce le informazioni indispensabili per la qualificazione e l'identificazione senza le quali gli altri due paragrafi non potrebbero essere applicati.
In questo paragrafo troviamo tutte le informazioni necessarie affinché i materiali e i prodotti ad uso strutturale a base di legno, come avviene per gli altri materiali, possano essere:

- identificati univocamente a cura del produttore, secondo le procedure applicabili;
- qualificati sotto la responsabilità del produttore, secondo le procedure applicabili;
- prescritti dal Progettista, secondo le caratteristiche meccaniche necessarie e comunque conformi alle normative applicabili;
- accettati dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

Lo scopo del paragrafo e delle indicazioni in esso contenute è quello di fornire le informazioni necessarie affinché la produzione, fornitura e utilizzazione dei prodotti a base di legno per uso strutturale possano avvenire in applicazione di un sistema di assicurazione della qualità e di rintracciabilità che consenta di poter individuare ogni passaggio intermedio dal momento della classificazione e/o marchiatura dei singoli componenti fino al momento della messa in opera.
A questo proposito nel paragrafo viene specificato che ogni fornitura di materiale dovrà essere accompagnata dalla seguente documentazione:

- l'individuazione dello stabilimento cui l'istanza si riferisce;
- il tipo di elementi strutturali che l'azienda è in grado di produrre;
- l'organizzazione del sistema di rintracciabilità relativo alla produzione di legno strutturale;
- l'organizzazione del controllo interno di produzione, con l'individuazione di un "Direttore Tecnico della produzione" qualificato alla classificazione del legno strutturale ed all'incollaggio degli elementi ove pertinente;
- il marchio afferente al produttore specifico per la classe di prodotti "elementi di legno per uso strutturale";
- un manuale contenente le specifiche tecniche per la posa in opera.

Il Direttore dei Lavori che non riceva una documentazione conforme a quanto sopra indicato è tenuto a rifiutare la fornitura e potrà inoltre, anche se la documentazione è conforme, prescrivere ulteriori prove di accettazione qualora lo ritenga necessario.
Ciascun prodotto qualificato dovrà essere riconoscibile per quanto concerne le caratteristiche qualitative e riconducibile allo stabilimento di produzione tramite marchiatura indelebile depositata presso il Servizio Tecnico Centrale, conforme alla relativa norma armonizzata.
Il Direttore Tecnico della produzione, di comprovata esperienza e dotato di abilitazione professionale tramite apposito corso di formazione, assumerà le responsabilità relative alla rispondenza tra quanto prodotto e la documentazione depositata. A questo proposito, l'associazione nazionale dei produttori di materiali a base di legno, Federlegno-Arredo, ha già attivato dal 2007 i corsi di formazione per Direttore Tecnico della produzione per i propri iscritti.
Nel paragrafo vengono definite le proprietà dei materiali e le relative procedure di qualificazione per i seguenti materiali:

- legno massiccio;
- legno lamellare incollato;
- legno strutturale con giunti a dita;
- pannelli a base di legno;
- altri prodotti derivati dal legno per uso strutturale;
- adesivi;
- elementi meccanici di collegamento.

Il paragrafo fornisce inoltre le indicazioni sui provvedimenti necessari ed i relativi riferimenti normativi al fine di garantire alla struttura nel suo insieme e ai suoi componenti strutturali il requisito di durabilità, specificando i fattori fondamentali da tenere in considerazione e i requisiti che i materiali a base di legno e i materiali accessori utilizzati nella costruzione devono possedere.
Per ulteriori informazioni in relazione alle procedure di qualificazione e accettazione dei prodotti strutturali a base di legno, che al momento della redazione di questo testo sono al vaglio della Commissione di Monitoraggio come tutte le altre parti del Decreto e quindi suscettibili di venire aggiornate, si invita a consultare il Servizio Tecnico Centrale oppure a contattare Assolegno (www.federlegno.it).

LE CNR/DT 206:2007

Nell'ambito dei Riferimenti Tecnici citati nel Cap.12 delle Norme Tecniche per le Costruzioni, vengono citati come documenti applicativi, oltre agli Eurocodici per la progettazione strutturale con cui le norme sono sostanzialmente coerenti, per quanto non in contrasto con quanto specificato nelle Norme Tecniche, i seguenti documenti:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, come licenziate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e ss. mm. ii.;
- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.).

Oltre alla possibilità di utilizzare altri codici internazionali, purché sia dimostrato che garantiscano livelli di sicurezza non inferiori a quelli stabiliti dalle Norme Tecniche.

Cosa vuol dire tutto questo?

Come detto al paragrafo precedente, le Norme Tecniche per le Costruzioni, in particolare con riferimento al §4.4. relativo alla progettazione e verifica delle strutture di legno, sono di per sé insufficienti per la progettazione. Necessitano pertanto di *documenti applicativi,* ossia di altre normative o documenti tecnici in cui siano presenti tutti i riferimenti tecnici e le formule di calcolo e verifica necessarie al progettista che intenda cimentarsi con il progetto di una costruzione di legno.
Nell'ambito di questa possibilità, il CNR per il tramite della propria Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni, ha prodotto un documento tecnico che possa servire da supporto agli ingegneri impegnati nelle varie fasi della progettazione di strutture di legno, in linea con le conoscenze più avanzate del settore.
Il documento prodotto, che prende il nome di CNR/DT 206, è stato approvato in versione preliminare in data 24 luglio 2006 e, superata la fase di inchiesta pubblica, in versione definitiva in data 28 novembre 2007. È disponibile e scaricabile al seguente indirizzo web del sito del CNR:
http://www.cnr.it/sitocnr/IlCNR/Attivita/NormazioneeCertificazione/DT206_2007.html
Il documento, redatto secondo l'approccio del metodo semiprobabilistico agli Stati Limite, risulta in accordo con le prescrizioni contenute nell'Eurocodice 5 e nell'Eurocodice 8 e raccoglie il meglio dell'esperienza maturata a livello internazionale nello specifico ambito normativo, senza perdere di vista le singolari caratteristiche della realtà italiana.

In sostanza le CNR DT/206 rappresenteranno in futuro quello che finora hanno rappresentato le CNR 10011 per l'acciaio, ossia il documento tecnico più utilizzato in Italia per la progettazione, che accompagna e completa le indicazioni generali sulla progettazione e sui valori dei coefficienti di sicurezza già contenuti nelle Norme Tecniche.
Riassumendo, il progettista che intenda progettare una struttura di legno ha attualmente tre possibilità:

- utilizzare le Norme Tecniche per le Costruzioni (definizione delle azioni di progetto e dei valori dei coefficienti di sicurezza sui materiali) insieme all'Eurocodice 5 (formule di progetto e verifica e disposizioni costruttive);
- utilizzare le Norme Tecniche per le Costruzioni (definizione delle azioni di progetto e dei valori dei coefficienti di sicurezza sui materiali) insieme alle CNR/DT 206 (formule di progetto e verifica e disposizioni costruttive);
- utilizzare le Norme Tecniche per le Costruzioni (definizione delle azioni di progetto e dei valori dei coefficienti di sicurezza sui materiali) insieme ad altri codici di calcolo internazionali, quali, ad es. le norme tedesche DIN 1052:2004 (formule di progetto e verifica e disposizioni costruttive).

La possibilità di utilizzare i documenti normativi sopra citati insieme alle Norme Tecniche, è bene ricordarlo ancora una volta, è subordinata al rispetto delle indicazioni in essa presenti (in particolare con riferimento ai valori dei coefficienti di sicurezza) e in generale al mantenimento di livelli di sicurezza non inferiori a quelli stabiliti dalle stesse Norme Tecniche.

Non è possibile in questa sede, ovviamente, né d'altra parte è la finalità delle Linee Guida, spiegare tutto il contenuto delle CNR DT 206. Pertanto si rimanda, ancora una volta, per quanto riguarda i criteri di progettazione e calcolo delle strutture di legno al §4.5.

Le istruzioni, come specificato anche nella premessa, sono state redatte sulla falsariga dell'Eurocodice 5 Parte 1-1, ma contengono anche un cenno al comportamento al fuoco delle strutture di legno, presente nella parte 1-2 dell'Eurocodice 5.

Rispetto all'Eurocodice 5 sono presenti alcune importanti differenze:

- vengono introdotti tra i materiali al punto 4.1.5 i Pannelli di tavole incrociate (sia incollati che chiodati);

- viene introdotto al punto 7.10 il calcolo resistenza di collegamenti con elementi di acciaio incollati;
- viene introdotto al punto 7.12 il calcolo della resistenza e rigidezza di connessioni trave-soletta in c.a.;
- viene introdotto al capitolo 10 il requisito di Robustezza;
- viene introdotto al capitolo 11 il requisito di Durabilità;
- viene introdotto al capitolo 15 il paragrafo Prove di carico;
- viene introdotta una Appendice D sulla applicabilità delle norme per le strutture esistenti.

In sostanza le CNR/DT 206 sono una sorta di Eurocodice 5 parte 1-1 ampliato e adattato al caso italiano. Vengono infatti affrontati alcuni aspetti della progettazione, come il calcolo dei solai misti legno-cls molto utilizzati nel nostro paese sia nelle nuove costruzioni che anche e soprattutto nel consolidamento di solai in legno in edifici in muratura e la verifica delle strutture lignee esistenti, specificità nella quale i tecnici progettisti italiani sono, per esperienza e capacità progettuali, tra i primi al mondo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] D.M. II.TT. - 14/01/08 “Norme tecniche per le costruzioni”.
[2] D.M. II.TT. - 6/5/2008 “Integrazioni al decreto 14 gennaio 2008 di approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”.
[3] CNR DT 206/2007 “Istruzioni per il progetto, l’esecuzione ed il controllo delle strutture di legno”.
[4] UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici.
[5] UNI EN 1995-1-2: Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Progettazione strutturale contro l’incendio.
[6] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici.
[7] UNI EN 12512 “Strutture di legno – Metodi di prova – Prove cicliche su giunti realizzati con connettori meccanici”.
[8] AA.VV. (2007), *Linee guida per la fornitura dei prodotti strutturali a base di legno*, Assolegno – Federlegno Arredo.

4.3 LA SITUAZIONE IN EUROPA: GLI EUROCODICI

Sono passati ormai quasi trent'anni dalla pubblicazione della prima serie di Eurocodici. Tuttavia, nonostante la ratifica da parte dell'Italia nel 1996 dell'Eurocodice 2 (calcestruzzo armato) e dell'Eurocodice 3 (acciaio) sotto forma di norme europee sperimentali volontarie (ENV), e la pubblicazione dei relativi Annessi Nazionali con l'indicazione dei valori dei coefficienti di sicurezza assegnati dal nostro Paese, la maggior parte dei progettisti italiani ha per lungo tempo ignorato la novità, rimanendo fedele al più semplice e ben radicato calcolo con il "metodo delle tensioni ammissibili".
Tutto questo è stato superato sia dal ricambio generazionale che ha portato oramai già da una decina d'anni a nuove generazioni di laureati formati unicamente sugli Eurocodici, sia alla parallela evoluzione di tutte le normative europee e mondiali verso il metodo semiprobabilistico agli stati limite.
Nel caso delle strutture di legno nel nostro paese, l'approccio agli Eurocodici è stato in un certo senso facilitato dalla mancanza di regole di calcolo nazionali basate sulle tensioni ammissibili. La maggior parte dei (pochi) progettisti che si sono cimentati con la progettazione di una costruzione di legno utilizzava, fino alla fine degli anni '90, la Norma Tedesca DIN 1052, con l'approvazione formale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Ma anche la vecchia e usatissima versione delle DIN 1052 del 1988 alle tensioni ammissibili è stata sostituita dall'attuale versione del 2008 agli stati limite. Inoltre nel caso del legno strutturale, a causa del legame lineare tensioni-deformazioni fino a rottura, anche nel metodo agli stati limite si continua a ragionare in termini di tensioni e non, come avviene per il cemento armato o l'acciaio, in termini di caratteristiche di sollecitazione. Ciò di fatto rende molto più semplice il calcolo di progetto e verifica al tecnico progettista, tanto che nel caso del legno si può affermare che il metodo agli stati limite costituisce una sorta di "metodo delle tensioni ammissibili mascherato".
L'organismo europeo preposto alla preparazione e alla pubblicazione degli Eurocodici è il CEN, che attraverso il comitato tecnico CEN-TC 250 istituito nel 1990, ha finora pubblicato 58 diverse parti di norme che insieme compongono i 9 Eurocodici per la progettazione strutturale con i diversi materiali da costruzione (cemento armato, acciaio, muratura, legno e alluminio). Queste 58 norme che definiscono i criteri di progettazione, le azioni sulle strutture e le regole di calcolo specifiche con i diversi materiali per le combinazioni fondamentali e per la progettazione nei confronti delle azioni sismiche e dell'incendio, sono disponibili e utilizzabili in parallelo con le rispettive norme nazionali fino al 2010, termine oltre il quale tutte le specifiche norme nazionali in conflitto verranno ritirate. In Italia gli Eurocodici vengono pubblicati e tradotti a cura dell'UNI, Ente Italiano di Unificazione che è il corrispondente in Italia del CEN.

L'Eurocodice relativo al legno è l'Eurocodice 5, pubblicato nella sua versione definitiva nel 2004, che è diviso in tre parti:

- EN 1995-1-1 – Progettazione delle strutture di legno – Parte 1-1: Regole Generali e regole per gli edifici;
- EN 1995-1-2 – Progettazione delle strutture di legno – Parte 1-2: Progettazione strutturale contro l'incendio;
- EN 1995-2 – Progettazione delle strutture di legno – Parte 2: Ponti.

Inoltre è presente un capitolo relativo alle regole specifiche per le strutture di legno nell'Eurocodice relativo alla progettazione strutturale nei confronti delle azioni sismiche, l'Eurocodice 8, pubblicato nella sua versione definitiva sempre nel 2004 (EN 1998-1: Progettazione per la resistenza nei confronti delle azioni sismiche. Parte 1: Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici).
Ogni paese membro che recepisce gli Eurocodici strutturali dovrà pubblicare un documento che dovrà necessariamente contenere il testo completo dell'Eurocodice (comprese tutte le appendici), così come pubblicato dal CEN, il quale potrà essere preceduto da una copertina Nazionale e da una premessa Nazionale, e può essere seguito da una appendice Nazionale. L'Appendice Nazionale può contenere solo informazioni su quei parametri, noti come Parametri Determinati a livello Nazionale, che in ogni Eurocodice sono lasciati aperti ad una scelta a livello Nazionale, da impiegarsi nella progettazione degli edifici e delle opere di ingegneria civile da realizzarsi nella singola nazione, e cioè:

- valori e/o classi per i quali nell'Eurocodice sono fornite alternative;
- valori da impiegare, per i quali nell'Eurocodice è fornito solo un simbolo;
- dati specifici della singola nazione (geografici, climatici, ecc.), per esempio, la mappa della neve;
- la procedura da impiegare quando nell'Eurocodice ne sono proposte diverse in alternativa;
- decisioni riguardanti l'applicazione delle appendici informative;
- riferimenti ad informazioni complementari non contraddittorie che aiutino l'utente ad applicare l'Eurocodice.

Le Appendici Nazionali dovranno naturalmente essere conformi e non in contrasto con quanto previsto nelle rispettive Norme Nazionali per i vari materiali da costruzione ossia dovranno garantire lo stesso livello di sicurezza delle norme nazionali o comunque un livello non inferiore.
Naturalmente prima di poter recepire un dato Eurocodice e pubblicare l'Appendice Nazionale deve esistere una norma nazionale di riferimento corrispondente.
In Italia le Appendici Nazionali sono state già prodotte per tutti gli Eurocodici. Tuttavia per il caso del legno, pur essendo l'Eurocodice 5 allo stato attuale pienamente utilizzabile e applicabile per la progettazione (rientrando peraltro nel novero delle norme di riferimento citate dalle Norme Tecniche), a causa del ritardo con il quale il nostro paese si è dotato di una norma tecnica nazionale, la pubblicazione dell'Appendice Nazionale non è ancora avvenuta. L'Appendice è stata comunque già scritta e ha già superato tutte le fasi preliminari alla pubblicazione e, compatibilmente con i tempi non proprio brevi che nel nostro paese ha una norma per arrivare alla sua definitiva uscita, dovrebbe essere emanata a breve.

EUROCODICE 5 "PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE DI LEGNO"

L'Eurocodice 5 definisce le regole di progettazione, calcolo ed esecuzione delle strutture di legno, relativamente ai requisiti di resistenza meccanica, funzionalità, durabilità e resistenza al fuoco. Non vengono considerati altri requisiti quali ad es. l'isolamento termico o acustico. È diviso in tre parti come descritto al paragrafo precedente e si basa sul metodo semiprobabilistico agli stati limite. Il suo utilizzo è legato ad altri documenti che vengono qui di seguito descritti brevemente:

- Per i carichi e sovraccarichi bisogna fare riferimento all'*Eurocodice 0 (EN 1990) "Basi di calcolo per la progettazione"* e alle varie parti dell'*Eurocodice 1 (EN 1991) "Azioni sulle strutture"*;
- Per le costruzioni in zona sismica le indicazioni integrative relative alle costruzioni di legno sono contenute *nell'Eurocodice 8 (UNI EN 1998 – 1 – Capitolo 8 "Regole specifiche per gli edifici a struttura di legno");*
- Per le caratteristiche fisiche (massa volumica) e meccaniche (proprietà di resistenza e di rigidezza) del legno si deve fare riferimento a due distinti documenti: la *UNI EN 338 "Legno strutturale - Classi di resistenza"* per il legno massiccio ed la *UNI EN 1194 "Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici"* per il legno lamellare incollato;
- Per gli altri materiali a base di legno (pannelli di particelle e di fibre, compensato, OSB, LVL), per i mezzi di collegamento o componenti strutturali e i relativi metodi di prova (adesivi, elementi meccanici di collegamento, pareti a telaio e pannello leggero di rivestimento) si trova riferimento nella parte introduttiva alle specifiche norme EN di prodotto.

All'interno della norma vengono affrontati i seguenti argomenti specifici relativi alla progettazione:

- Criteri generali e basi di calcolo;
- Proprietà dei materiali;
- Durabilità;
- Basi di analisi strutturale;
- Stati limite ultimi;
- Stati limite di servizio;
- Collegamenti con elementi meccanici di collegamento;
- Componenti e assemblaggi;
- Particolari strutturali e controllo.

Non si affrontano in questa sede i temi specifici relativi alla progettazione strutturale e alle basi di calcolo per i quali si rimanda ai §4.5, 4.6 e 4.7. In ogni caso, in linea generale, la progettazione agli stati limite di una struttura di legno secondo l'Eurocodice 5 deve tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- Le proprietà dei materiali in termini di resistenza e rigidezza;
- Le caratteristiche di dipendenza dal tempo delle proprietà di resistenza e rigidezza (durata del carico, viscosità);
- Le condizioni climatiche (temperatura, variazioni di umidità);
- Le diverse fasi di progetto (fasi di costruzione, cambiamento delle condizioni di vincolo).

Le verifiche agli stati limite ultimi vanno condotte per gli elementi strutturali e per le sezioni lignee in termini di tensioni (come detto in precedenza proprio come nel metodo delle tensioni ammissibili) e per i collegamenti in termini di sforzi, tenendo conto della dipendenza delle proprietà di resistenza del materiale dalla durata del carico e dal contenuto di umidità del legno.

Le verifiche agli stati limite di esercizio sono sostanzialmente le verifiche di deformabilità degli elementi strutturali e di scorrimento dei giunti. Rappresentano spesso, in particolar modo per le strutture orizzontali quali solai e coperture, le verifiche determinanti nel dimensionamento di una struttura di legno. Le verifiche vanno effettuate per la deformazione istantanea, calcolata secondo quanto specificato nella EN 1990 [8], considerando la

combinazione caratteristica delle azioni e il valore medio dei moduli di elasticità, di taglio e di scorrimento per le unioni, e per la deformazione finale, considerando la combinazione quasi-permanente delle azioni e il comportamento viscoso del materiale mediante l'applicazione degli opportuni coefficienti di viscosità. I limiti di deformabilità vengono dati solamente a livello indicativo; sarà poi compito del progettista adottare i valori più opportuni in funzione dell'importanza dell'elemento strutturale, delle caratteristiche dei materiali e degli elementi non strutturali portati (ad es. per un solaio si potranno stabilire limiti diversi in funzione della presenza di tramezzi rigidi in muratura oppure di tramezzi leggeri rivestiti in cartongesso o pannelli a base di legno, oppure in funzione del tipo di pavimentazione utilizzata, ad es. se in ceramica o in legno).

EUROCODICE 8 "PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE PER LA RESISTENZA ALLE AZIONI SISMICHE"

Il Capitolo 8 dell'Eurocodice 8 (UNI EN 1998-1:2004) "Regole specifiche per gli edifici a struttura di legno" contiene le regole specifiche per la progettazione delle strutture di legno nei confronti delle azioni sismiche. Si evidenzia ancora una volta, come già spiegato in §4.2, che queste regole integrano quelle già presenti nell'Eurocodice 5 per la progettazione nelle combinazioni fondamentali.
È, come detto in §4.2, sostanzialmente molto simile al §7.7 del DM 14/01/08 "Norme Tecniche per le Costruzioni" essendo quest'ultimo la sua pressoché fedele traduzione in italiano, pertanto si rimanda a quanto già detto in §4.2 per il suo contenuto specifico.

Tuttavia il contenuto di entrambi i documenti è ancora sostanzialmente identico al "vecchio" paragrafo 4 della parte 1.3 della versione sperimentale dell'Eurocodice 8 del 1998, (UNI ENV 1998-1-3:1998 Eurocodice 8. Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 1-3: Regole generali – Regole specifiche per i diversi materiali ed elementi), pertanto le regole per la progettazione di edifici a struttura di legno in zona sismica risalgono sostanzialmente a dieci anni fa e necessitano di alcuni aggiornamenti per tenere in considerazione i progressi scientifici raggiunti e l'evoluzione tecnologica che si è avuta nel settore delle costruzioni di legno.
Per questo motivo si riportano in questa sede, facendo riferimento alle varie sezioni del capitolo già spiegate in §4.2 e secondo l'opinione degli autori, le integrazioni e i miglioramenti che sarebbero necessari per aggiornare la norma allo stato dell'arte attuale, anche considerando le specificità presenti nel nostro patrimonio architettonico.

Materiali e proprietà nelle zone dissipative

100 Per l'utilizzo come pareti di taglio o diaframmi orizzontali occorre inserire nuovi materiali recentemente sviluppati (es. i pannelli a strati di tavole incrociate) indicando spessori minimi ammessi, composizione ed eventualmente valore minimo della massa volumica.

Tipologie strutturali, classi di duttilità e fattori di struttura

L'attuale tabella delle tipologie strutturali ammesse, delle classi di duttilità e del corrispondente valore del fattore di struttura risulta abbastanza stringata e essenziale.

Classe	q	Esempi di strutture
Strutture aventi una alta capacità di dissipazione energetica - DCH	3,0	Pannelli di parete chiodati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni; strutture reticolari con giunti chiodati
	4,0	Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (vedi 8.1.3 (3)P)
	5,0	Pannelli di parete chiodati con diaframmi chiodati, collegati mediante chiodi e bulloni
Strutture aventi una media capacità di dissipazione energetica - DCM	2,0	Pannelli di parete incollati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni; strutture reticolari con collegamenti a mezzo di bulloni o spinotti; strutture cosiddette miste, ovvero con intelaiatura (sismoresistente) in legno e tamponature non portanti Portali isostatici con giunti con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (con le precisazioni contenute nei seguenti capoversi del § 7.7.3)
	2,5	Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni (vedi 8.1.3 (3)P)
Strutture aventi una media capacità di dissipazione energetica - DCL	1,5	Strutture a sbalzo, travi, archi a due cerniere, reticolari con connettori

Tabella 4.3: Tipologie strutturali e fattori di struttura massimi q per le classi di duttilità secondo l'Eurocodice 8.

Ci sono varie osservazioni da fare relativamente a questa tabella e alle modifiche da apportare.

1. Sono totalmente assenti alcuni sistemi costruttivi diffusi sia nel nostro paese che nel resto d'Europa ed il corrispondente valore del fattore di struttura. Tra questi il sistema Log-House o Block House ed il sistema a pareti portanti con pareti e solai formati da pannelli a strati di tavole incrociate diffuso recentemente in Italia e in Europa.
2. Nella stessa tabella mancano degli schemi grafici o illustrazioni che servano a comprendere meglio di quale sistema costruttivo si sta parlando. Tali illustrazioni erano presenti nella versione sperimentale dell'Eurocodice 8 del 1998 e poi sono state inspiegabilmente eliminate. L'attribuzione della classe di duttilità e l'assegnazione del valore del fattore di struttura è un elemento fondamentale per la corretta progettazione nei confronti delle azioni sismiche e non deve dare adito a errate interpretazioni.
   Ad esempio la tipologia strutturale *Pannelli di parete incollati con diaframmi incollati, collegati mediante chiodi e bulloni* non è il sistema a pannelli a strati incrociati, ma, senza illustrazioni e descrizioni più dettagliate, è difficile capire a quale sistema costruttivo si faccia riferimento e pertanto è facile attribuire un valore del fattore di struttura non corretto.
3. Il sistema costruttivo *Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni* è presente due volte prima con un valore del fattore di struttura 4 e poi 2,5. Il motivo di questa ripetizione, che ingenera confusione, è dovuto al fatto che lo stesso sistema può assumere due differenti valori del fattore di struttura a seconda del rispetto o meno delle regole specifiche di duttilità relative al diametro degli elementi di collegamento e allo spessore delle membrature. Ma dato che, all'interno dello stesso paragrafo viene riportata successivamente la tabella dei fattori di struttura ridotti (Tabella 4.4) da adottare nel caso in cui le regole di duttilità non vengano rispettate, non si vede il motivo di ripetere due volte lo stesso sistema con due valori del fattore di struttura diversi in Tabella 4.3. Tra l'altro lo stesso principio non è stato adottato per il sistema Platform (Pannelli di parete chiodati con diaframmi chiodati) nella Tabella 4.3 è presente una sola volta con il valore massimo del fattore di struttura (5) ed è poi riportato in Tabella 4.4 con il valore del fattore di struttura ridotto.

Successivamente infatti viene riportata la seguente tabella da adottare nel caso in cui le regole di duttilità sopra citate non vengano rispettate:

Tipologia strutturale	Fattore di struttura q
Portali iperstatici con mezzi di unione a gambo cilindrico, spinotti e bulloni	2,5
Pannelli di parete chiodati con diaframmi chiodati	4,0

Tabella 4.4: Tipologie strutturali e fattori di struttura ridotti secondo l'Eurocodice 8.

Disposizioni costruttive

La maggior parte delle indicazioni progettuali e costruttive per giunti e orizzontamenti sono riferite a edifici realizzati con il sistema Platform Frame, attualmente il sistema costruttivo a struttura di legno più conosciuto e più utilizzato al mondo per la realizzazione di edifici residenziali, anche multipiano.
I risultati della ricerca conseguiti recentemente in Italia e nel resto del mondo consentono di poter integrare tali disposizioni anche per altri sistemi costruttivi (pannelli portanti, strutture intelaiate, etc.).
Sarebbe opportuno inoltre suddividere il paragrafo in 3-4 sottoparagrafi riferiti ai sistemi costruttivi più diffusi e utilizzati (Platform Frame, Pannelli Portanti, Sistemi a telaio, Log House) lasciando delle indicazioni generali per tutti gli altri sistemi costruttivi.

Occorre inoltre inserire un paragrafo con indicazioni più precise sul comportamento ciclico e sulle tecniche di realizzazione dei giunti di carpenteria di tipo antico e moderno (es. giunti a coda di rondine). In Italia sono state fatte diverse esperienze a proposito (soprattutto nel nostro paese dal Prof. M. Piazza all'Università di Trento) e sarebbe un peccato non "tradurre" i risultati di tali esperienze in semplici indicazioni normative e costruttive utili al progettista.

Infine, sempre facendo riferimento al caso italiano, occorrerebbe inserire un paragrafo relativo al comportamento delle strutture di legno inserite in edifici di muratura (solai e coperture) con indicazione sulle corrette modalità di collegamento alle murature d'ambito e sulle tecniche di irrigidimento nel piano di solai e coperture in legno (magari spiegando una volta per tutte che un solaio misto legno-calcestruzzo è "misto" solo nel comportamento nei confronti dei carichi verticali e non nei confronti delle azioni orizzontali come quelle sismiche, nei confronti delle quali la soletta di calcestruzzo, di adeguato spessore e correttamente armata, è già di per sé in grado di garantire sufficiente rigidezza nel piano).

In ogni caso, pur considerando le carenze e i necessari aggiornamenti della norma sopra evidenziati, il capitolo 8 dell'Eurocodice 8 relativo alle regole specifiche per le strutture di legno, costituisce una solida base tecnica e scientifica per progettare con fiducia i sistemi strutturali in legno nei confronti delle azioni sismiche. L'aggiornamento della norma, peraltro periodicamente necessario per qualsiasi normativa sulle costruzioni, non

tarderà ad arrivare e consentirà di colmare le lacune ancora presenti. Peraltro lo stesso Eurocodice 8 ammette, in linea di principio, l'uso di qualsiasi tipo di giunto o sistema costruttivo purché ne venga dimostrata la capacità plastica e dissipativa secondo le prescrizioni contenute in procedure di prova stabilite da apposite norme (EN 12512 "Strutture di legno – Metodi di prova – Prove cicliche su giunti realizzati con connettori meccanici"). Questa prescrizione non è data, come verrebbe da pensare, per complicare la vita al progettista, ma al contrario è concepita allo scopo di evitare limitazioni all'utilizzo delle strutture in legno in zona sismica, consentendo l'impiego di sistemi costruttivi non comuni o tradizionali o comunque non contemplati dalla norma, purché ne venga verificato il grado di efficacia nei confronti dell'azione sismica e di conseguenza si adottino valori corretti per le azioni e le resistenze di progetto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] UNI EN 1992-1: Eurocodice 2 – "Progettazione delle strutture di calcestruzzo".
[2] UNI EN 1993-1: Eurocodice 3 – "Progettazione delle strutture di acciaio".
[3] DIN 1052 - "Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken . Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau".
[4] UNI EN 1995-1-1: "Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici".
[5] UNI EN 1995-1-2: "Eurocodice 5 - Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio".
[6] UNI EN 1995-2 – "Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno – Parte 2: Ponti".
[7] UNI EN 1998-1 "Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici".
[8] UNI EN 1990: Eurocodice 0 - Criteri generali di progettazione strutturale.
[9] UNI EN 1991-1: Eurocodice 1 – Azioni sulle strutture.
[10] UNI EN 338 – "Legno strutturale - Classi di resistenza".
[11] UNI EN 1194 "Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici".
[12] UNI EN 12512 "Strutture di legno – Metodi di prova – Prove cicliche su giunti realizzati con elementi meccanici di collegamento".

4.4 I REGOLAMENTI EDILIZI COMUNALI ED IL LORO RAPPORTO CON L'EDILIZIA IN LEGNO

Applicare i principi bioclimatici e utilizzare materiali eco-compatibili consente al progettista di assicurare in un edificio, o in un complesso di edifici, caratteristiche prestazionali e condizioni di benessere tali da ottimizzare le condizioni ambientali 'interne' facendo ricorso il più possibile alle risorse presenti in loco e/o rinnovabili. L'applicazione di tali principi era, sino a poco tempo fa, una scelta 'intellettuale' o ideologica, adottata per lo più da una minoranza. Oggi, grazie alla maggiore consapevolezza delle questioni ambientali e socioeconomiche correlate, la sostenibilità è un principio verso cui si orientano i processi di sviluppo e le programmazioni della maggior parte delle organizzazioni, sia di tipo sociale che commerciale.
Realizzare edifici sostenibili è quindi un processo che ha implicazioni sia qualitative che quantitative, da un lato sulla qualità dell'abitare (salute, sicurezza, relazioni), dall'altro sull'efficienza dei processi produttivi e di gestione (tecnologia, energia, risorse). E da questo punto di vista il legno ha pochi rivali: è *il* materiale rinnovabile per definizione. Per la sua produzione non è necessario utilizzare dei processi di estrazione attraverso l'erosione di montagne o la creazione di miniere nel sottosuolo, ma può essere ottenuto semplicemente attraverso la coltivazione senza alcun processo di trasformazione inquinante.

LE AZIONI INTRAPRESE A LIVELLO COMUNITARIO E NAZIONALE

La Commissione Europea ha fissato l'obiettivo di incoraggiare "*….gli Stati membri a dotarsi di piani d'azione accessibili al pubblico per l'integrazione delle esigenze ambientali negli appalti pubblici*". Tuttavia il tema della sostenibilità nel costruire fatica a diventare uno dei punti cardine dei regolamenti edilizi locali del nostro paese, al contrario di quanto invece sta già avvenendo in altri paesi europei. Il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ha redatto nel 2007 un "Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione" con "*l'obiettivo di integrare considerazioni di carattere ambientale all'interno dei processi di acquisto delle Pubbliche Amministrazioni e di orientarne le scelte su beni, servizi e lavori che presentano i minori impatti ambientali*". Il piano si pone l'obiettivo di portare, entro il 2009, il livello degli acquisti "ambientalmente preferibili" in linea con i più elevati livelli europei e rinvia ad appositi decreti emanati dal Ministero l'individuazione di un set di criteri ambientali "minimi" per ciascuna tipologia di acquisto che ricade nell'ambito delle categorie merceologiche individuate. Per ogni categoria verranno definiti dei criteri e obiettivi quantitativi e temporali che consentiranno un calcolo approssimativo degli "impatti ambientali risparmiati", attraverso l'uso di opportuni indicatori (ad es. nel settore dell'edilizia, kg di CO_2 risparmiati per mc. di volume costruito). Il ruolo delle strutture di legno in questo contesto è evidente, ma ancora non esplicito.

Sempre in questo ambito, un altro passaggio fondamentale costituisce lo schema "Norme per l'edilizia sostenibile" redatto nel marzo del 2007 dall'"Istituto per l'innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale" (ITACA), associazione tra tutte le Regioni italiane e le Province Autonome di Trento e Bolzano. Lo scopo del documento è stabilire un metodo per la certificazione della sostenibilità degli edifici definendo una serie di parametri ambientali complessivi attraverso un sistema di valutazione a schede detto "Protocollo"; in questo modo si promuove la costruzione di edifici sostenibili con una serie di incentivazioni quali:

- sconti sugli oneri di urbanizzazione;
- esclusione dal calcolo dei parametri edilizi (modifica regolamenti edilizi e RET) di maggiori spessori e volumi derivanti dalla migliore qualità dell'edificio murature più spesse, sistemi passivi di captazione della luce e del calore e simili;
- possibili finanziamenti e/o contributi che possano coprire gli iniziali maggiori costi determinati dalla migliore qualità degli edifici.

All'art. 7 dello schema di legge "Criteri di selezione dei materiali da costruzione" viene specificato:
Nella realizzazione degli interventi di cui alla presente legge è previsto l'uso di materiali, di componenti edilizi e di tecnologie costruttive che:

a) siano riciclabili, riciclati, di recupero, di provenienza locale e contengano materie prime rinnovabili e durevoli nel tempo;
b) siano caratterizzati da ridotti valori di energia e di emissioni di gas serra inglobati;
c) rispettino il benessere e la salute degli abitanti.

Per quel che riguarda gli incentivi proposti per la realizzazione di edifici sostenibili è interessante notare che sono rivolti sia a soggetti pubblici che privati nella percentuale massima rispettivamente del 90 e del 15 per cento del costo totale dell'intervento.

I REGOLAMENTI EDILIZI COMUNALI NELLA NOSTRA REGIONE ED IL LORO RAPPORTO CON L'EDILIZIA IN LEGNO

Sulla base delle indicazioni del Protocollo ITACA la Regione Toscana ha pubblicato nel 2006 le *Linee guida per l'edilizia sostenibile in Toscana*, che rappresentano un testo di riferimento, indirizzato sia ad operatori privati che a pubbliche amministrazioni, per tutti coloro che intendano progettare e ristrutturare in modo tale da realizzare edifici energeticamente efficienti e compatibili con l'ambiente. All'interno dell'ultimo capitolo di questo testo, intitolato "*Elenco base dei materiali per l'edilizia sostenibile*", trova ampio risalto il legno e i prodotti da esso derivati, come unico materiale da costruzione rinnovabile, riciclabile e biodegradabile.
Recentemente alcuni Comuni hanno inserito nei propri regolamenti edilizi diverse forme di incentivazione, quali incrementi dei volumi ammissibili e/o una riduzione degli oneri di urbanizzazione secondaria per le costruzioni realizzate secondo i requisiti cardine della sostenibilità, ossia mediante la previsione di soluzioni tecnologiche che prediligano l'utilizzo di materiali naturali e il contenimento dei consumi energetici.

Il Regolamento Edilizio del Comune di Firenze, nella sua ultima versione approvata nell'Ottobre del 2008, prevede all'art. 196 – "Risparmio energetico, sviluppo delle fonti rinnovabili e corretto impiego dell'energia" - incentivi per interventi edilizi che prevedano, dal punto di vista energetico, una elevata qualità costruttiva associata ad interventi di riqualificazione puntuale come specificato nell'Allegato D dello stesso Regolamento dal titolo "Linee guida e raccomandazioni progettuali per l'uso efficiente dell'energia e per la valorizzazione delle fonti energetiche rinnovabili e assimilate negli edifici nelle grandi aree di trasformazione e sviluppo urbano, nelle nuove edificazioni e nelle estese ristrutturazioni". Tali incentivi possono essere sia di carattere economico, mediante una riduzione percentuale del contributo di concessione, oppure di carattere edilizio-urbanistico, mediante l'applicazione di coefficienti correttivi della S.U.L. (superficie utile lorda) che tengano conto del maggior ingombro planimetrico, a parità di carico urbanistico, degli edifici che siano progettati in conformità alle linee guida della sopra citata appendice per quanto attiene il risparmio energetico, lo sviluppo delle fonti rinnovabili ed il corretto impiego dell'energia.

Analoghe disposizioni si trovano sul Regolamento Edilizio del Comune di Siena approvato nel 2007, dove, nell'Allegato H "Piano Energetico Ambientale Comunale", si trovano indicazioni relative al misure da adottare per il contenimento energetico, il miglioramento dell'efficienza energetica e l'utilizzo delle fonti rinnovabili. Anche qui gli incentivi previsti consistono nell'abbattimento degli oneri di urbanizzazione o in incrementi di volume per interventi rispondenti ai criteri stabiliti nello stesso allegato.

Per il resto, almeno per quel che riguarda i regolamenti edilizi dei capoluoghi di Provincia Toscani, si trovano poche indicazioni sui criteri di sostenibilità e risparmio energetico e, soprattutto, nessuno sull'utilizzo del legno come materiale da costruzione. Anche gli stessi regolamenti edilizi di Firenze e Siena, pur parlando di materiali naturali, rinnovabili e bio-compatibili, non citano mai espressamente il legno. Da una lettura attenta dei regolamenti edilizi si può osservare che il termine *legno* è presente solamente in riferimento a strutture portanti orizzontali di solai e coperture inseriti in edifici di muratura, oppure come elementi di finitura o di arredo, ma mai viene inteso come struttura portante dell'edificio per le nuove costruzioni. Ciò riflette la pressoché totale assenza di precise indicazioni normative a livello nazionale sull'utilizzo del legno nelle costruzioni perdurante fino al 2005, e di questo non si può certo imputare alcuna responsabilità agli estensori dei regolamenti edilizi comunali. L'introduzione a pieno titolo del legno nelle nuove Nome Tecniche per le Costruzioni e il cambiamento culturale che sta orientando tutto il settore dell'edilizia verso una maggiore attenzione alle tematiche della sostenibilità, determinerà un necessario aggiornamento dei regolamenti che dovranno introdurre i sistemi strutturali in legno tra quelli ammessi, se non addirittura preferibili, per la realizzazione di manufatti edilizi.
Infatti solo da pochi anni in Toscana si sta diffondendo la consapevolezza che i Regolamenti Edilizi sono lo strumento strategico per introdurre criteri di qualità energetico ambientale nel settore edilizio e che l'attenzione agli usi finali dell'energia è la carta vincente nella competizione per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili .
La Legge regionale 1/2005 ha avuto il merito di richiamare l'attenzione degli Enti locali toscani sul tema della qualità e della ecoefficienza dell'ambiente urbano, che fino ad allora era stato completamente ignorato nei documenti di pianificazione urbanistica.
La vera innovazione è stato comprendere che costruire strutture urbane di qualità consente di ottenere miglioramenti ambientali e di incidere sulla qualità della vita e della salute dei cittadini.
Ad oggi il 24% dei comuni toscani ha introdotto nella propria regolamentazione edilizia criteri di ecoefficienza e anche se rimane molta strada da percorrere è consolante verificare come la cultura della qualità si stia rapidamente diffondendo.

UNO SGUARDO ALL'ESTERO: I REGOLAMENTI EDILIZI DI LONDRA E VANCOUVER

Per effettuare un confronto con quanto succede in altre parti del mondo vediamo quanto contenuto, relativamente alla realizzazione di edifici sostenibili, nei regolamenti edilizi di due grandi città: Londra e Vancouver.

Il regolamento edilizio del comune di Londra prescrive diverse strategie per lo sviluppo sostenibile e la riduzione delle emissioni di CO_2. Gli obiettivi stabiliti nel 2004, in linea con quelli prefissati dal governo britannico, erano di ridurre del 60% le emissioni di CO_2 nel 2050 rispetto a quelle valutate nel 1990 attraverso una serie di passaggi intermedi che prevedevano:

- una riduzione del 15% rispetto ai valori del 1990 nel 2010;
- una riduzione del 20% rispetto ai valori del 1990 nel 2015;
- una riduzione del 25% rispetto ai valori del 1990 nel 2020;
- una riduzione del 30% rispetto ai valori del 1990 nel 2025.

Tuttavia nel 2007 questi obiettivi, già particolarmente ambiziosi considerata la crescita di popolazione prevista per il 2025, sono stati ulteriormente ritoccati prevedendo una riduzione del 60% rispetto ai valori del 1990 nel 2025. Obbiettivo che naturalmente, come specificato nel piano d'azione sul cambiamento climatico, non potrà essere raggiunto senza un sostanziale contributo nelle azioni intraprese a livello politico dal governo nazionale.
Nell'ambito di questa politica, il Comune di Londra ha prodotto nel 2006 delle Linee Guida per la progettazione e costruzione di edifici sostenibili. Non si può riportare in questa sede tutto il contenuto del documento, ma si sottolineano alcuni aspetti interessanti nel contesto di questa pubblicazione. In riferimento ai materiali da utilizzare nelle nuove costruzioni le linee guida prevedono come obiettivo minimo:

- che il 50% del legno e dei prodotti a base di legno utilizzati debbono provenire da foreste temperate e certificate dal Forest Stewardship Council (FSC);
- non si devono utilizzare materiali isolanti che possano contenere sostanze che contribuiscano alla riduzione dello strato d'ozono nell'atmosfera o che possano contribuire al riscaldamento globale;
- il minimo utilizzo di nuovi aggregati.

Preferibilmente dovranno essere raggiunti i seguenti obiettivi:

- non devono essere utilizzati materiali ad alto impatto ambientale a meno che il loro utilizzo non venga giustificato mediante una analisi globale dell'impatto energetico e ambientale;
- il 90% del legno e dei prodotti a base di legno utilizzati devono provenire da foreste temperate e certificate dal Forest Stewardship Council (FSC);
- il 50% della massa totale dei materiali impiegati deve provenire da impianti, cave o centri di riciclaggio situati in un raggio di 60 km dal cantiere di costruzione;
- il 10% dei materiali devono essere materiali riciclati o riutilizzati;
- prima della demolizione deve essere certificata da un organismo competente la possibilità di massimizzare il riciclo dei materiali.

Dall'altra parte del mondo, la città di Vancouver in Canada ha deciso, attraverso l'esecuzione del Green House Program, di attuare pienamente gli accordi del protocollo di Kyoto e di ridurre del 33% le emissioni di CO_2 entro il 2020 e dell'80% entro il 2050. Tutti i nuovi edifici dovranno essere a bilancio di emissioni nullo di CO_2 entro il 2030.
Per quel che riguarda le strategie da adottare al fine di raggiungere gli obiettivi previsti, vengono specificati i criteri e gli obiettivi specifici per raggiungere un migliore isolamento termico negli edifici, ma non viene fatto alcun esplicito riferimento al materiale da costruzione. Questo probabilmente perché attualmente oltre l'80% degli edifici residenziali sono realizzati a struttura di legno, quindi sono già con un materiale naturale, riciclabile e che contribuisce a ridurre le emissioni di gas serra.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] Commissione Europea (2003), *Comunicazione al Parlamento Europeo 2003/302, Politica Integrata dei Prodotti – Sviluppare il concetto di "ciclo vita ambientale.*
[2] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2007), *Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione.*
[3] Istituto per l'innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale (ITACA) (Marzo 2007), *Norme per l'edilizia sostenibile,* Schema di legge Regionale.
[4] Direttiva della Comunità Europea 91/2002 – "Rendimento Energetico in Edilizia".
[5] D.L. n° 192 del 19/08/2005 – "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico in edilizia".
[6] Giunta Regionale Toscana, Direzione Generale della Presidenza, Area di Coordinamento Programmazione e Controllo, Settore Programmazione dello Sviluppo Sostenibile (2006), *Linee guida per l'edilizia sostenibile in Toscana*.
[7] Regolamento Edilizio del Comune di Firenze, 2008.
[8] Regolamento Edilizio del Comune di Carrara, 2006.
[9] Regolamento Edilizio del Comune di Siena, 2007.
[10] Regolamento Edilizio del Comune di Lucca, 2004.
[11] Regolamento Edilizio del Comune di Calenzano, 2006.

[12] Regolamento Edilizio del Comune di Pisa, 1998.
[13] Regolamento Edilizio del Comune di Massa, 2007.
[14] Regolamento Edilizio del Comune di Livorno, 2004.
[15] Regolamento Edilizio del Comune di Pistoia, 2003.
[16] Mayor of London (February 2007), *London CO_2. Action Today to Protect Tomorrow. The Mayor's Climate Change Action Plan.*
[17] Mayor of London (March 2006), *Sustainable Desing and Construction. The London Plan Supplementary Planning Guidance.*
[18] City of Vancouver Sustainability Group (March 2005), *Policy Report Environment.*
[19] Protocollo di Kyoto – "Convenzione sui cambiamenti climatici".

4.5 PRINCIPI DI PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE DI LEGNO

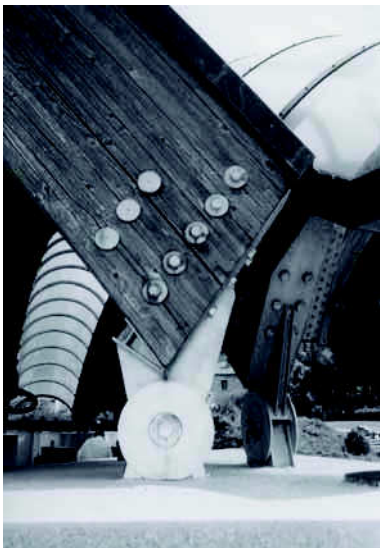
In questo paragrafo vengono illustrati i principi generali sulla progettazione delle strutture di legno, facendo riferimento al documento normativo più completo e condiviso, ossia l'Eurocodice 5 Parte 1-1 "Progettazione delle strutture di legno. Regole generali. Regole comuni e regole per gli edifici (EN 1995-1-1:2005)" integrati con i valori dei coefficienti di sicurezza indicati dal DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le costruzioni", mettendo in rilievo gli aspetti particolari delle verifiche che potrebbero risultare non familiari ai tecnici usualmente abituati a progettare con altri materiali, ma che risultano comunque di facile comprensione, una volta capite le motivazioni che ne stanno alle origini.

COME SI PROGETTANO LE STRUTTURE DI LEGNO

La progettazione delle strutture di legno non può prescindere dalla conoscenza del materiale, dei sistemi di unione, delle tipologie strutturali, dalle potenzialità del materiale e dalle sue carenze.
Molto spesso i progettisti utilizzano il legno cercando di inquadrarlo nelle regole del calcestruzzo armato, dell'acciaio o della muratura, regole da loro conosciute ma che nella maggior parte dei casi mal si prestano ad essere trasferite sulle strutture di legno.

Ritiro e rigonfiamento

Le dimensioni di un elemento ligneo variano in funzione delle variazioni termoigrometriche ambientali, il legno tende a raggiungere l'equilibrio igrometrico con l'ambiente cisrcostante, tuttavia l'umidità del legno subisce oscillazioni intorno ad un valore medio.
Ad esempio in locali quali le abitazioni civili il legno tende a assumere il 10% di umidità, con oscillazioni del ±2%, il legno all'esterno, al riparo dalle intemperie, si equilibrerà intorno al 17% con oscillazioni del ±5%.
Mentre in senso longitudinale le variazioni di umidità non sono accompagnate da variazioni dimensionali rilevanti, nella sezione (direzione trasversale) le variazioni di dimensione sono importanti, dell'ordine di 0,2% per ogni punto percentuale di umidità (per le conifere 0,24% in direzione tangenziale e 0,12% in direzione radiale).
Ad esempio una trave di altezza 30cm in ambiente esterno al riparo dalle intemperie, considerando l'oscillazione massima dell'umidità anzi detta, subirà variazioni di altezza fra la stagione secca e quella umida dell'ordine di 30x(5+5)x0,2/100 = 0,6cm = 6mm.
Bisogna pertanto consentire il libero movimento della sezione.



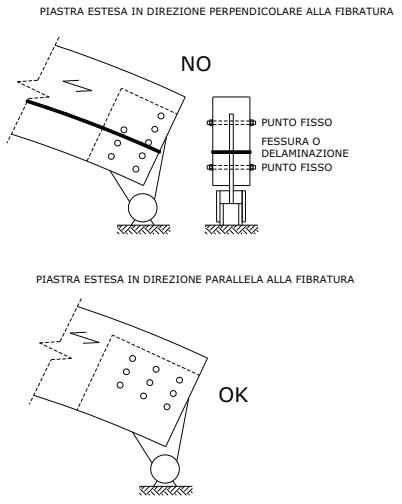


Figura 4.4: la notevole estensione dell'unione metallica in direzione ortogonale alla fibratura non permette al legno, esposto alla pioggia ed al sole, di ritirarsi liberamente, pertanto si è generata una fessura completamente passante la sezione. Sarebbe stato più opportuno limitare l'estensione della piastra in direzione ortogonale alla fibratura estendendola in direzione parallela.

Il problema del ritiro assume un rilievo maggiore quando si utilizza il legno massiccio che generalmente viene posato ad un livello di umidità ben maggiore rispetto alle condizioni di equilibrio, ad esempio una trave di altezza

20cm posta in opera ad umidità superiore al 30% in una abitazione raggiungerà in pochi anni il 10% di umidità, con una diminuzione di sezione di 20x(30-10)x0,2/100 = 0,8cm, cioè a stagionatura ultimata avrà altezza 19,2cm circa; tutto il solaio si sarà abbassato di quasi 1cm!
Nelle travi a fibratura deviata le variazioni di umidità sono accompagnate anche da svergolamento dell'elemento.

Figura 4.5: Nell'immagine a sinistra si nota la rotazione su di un appoggio, rotazione dovuta allo svergolamento della trave a seguito della stagionatura in opera. A destra invece un'altra trave della stessa copertura, trovandosi eccessivamente vincolata a torsione e non riuscendo quindi a ruotare sufficientemente agli appoggi, ha visto la fessura da ritiro passare da una faccia all'altra passando lo spigolo, determinando una vera e propria rottura per torsione. (Foto E. Nespolo).

Il problema del ritiro e rigonfiamento nei pannelli a strati incrociati e nei compensati è sentito solo nello spessore ma non nelle dimensioni nel piano.

La resistenza a trazione ortogonale alla fibratura

Uno dei punti deboli del legno è la bassissima resistenza a trazione ortogonale alla fibratura che assume valori da 0,4 a 0,6N/mm^2, quindi circa un quarantesimo rispetto alla resistenza a trazione parallela alla fibratura.
Tale sollecitazione viene evocata spesso nei giunti e nelle travi con carichi appesi.

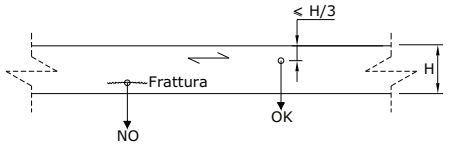


Figura 4.6: I carichi appesi alle travi è opportuno che siano entro il terzo superiore della trave.

Ad esempio in un sistema di travi che sorregge un controsoffitto pesante è necessario che le connessioni del controsoffitto alle travi siano entro il terzo superiore delle travi stesse per evitare che vengano "strappate" le fibre inferiori.
Nel disegno strutturale è sempre opportuno specificare con il simbolo la direzione della fibratura.
Il problema nasce anche nelle travi di legno lamellare a forma non prismatica: nelle travi rastremate in cui le lamelle risultano tagliate in corrispondenza dell'intradosso teso, la trazione all'intradosso ha una componente ortogonale alla fibratura che tende a rompere la trave; la posizione corretta è mantenere le lamelle continue e parallele all'intradosso teso.

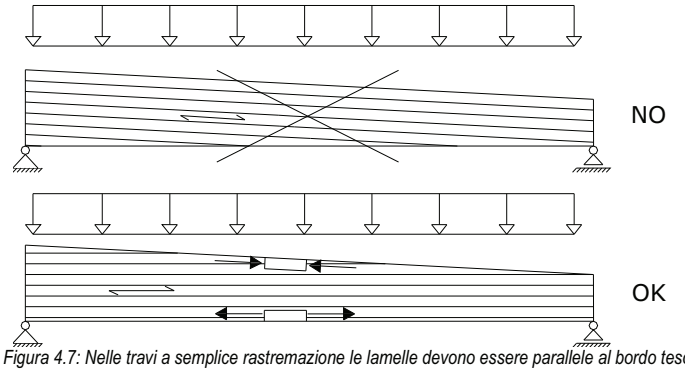


Figura 4.7: Nelle travi a semplice rastremazione le lamelle devono essere parallele al bordo teso.

Nelle travi centinate nascono nella zona centrale delle tensioni di trazione ortogonali alla fibratura, queste sono inversamente proporzionali al raggio di curvatura, è necessario quindi non utilizzare raggi troppo piccoli.

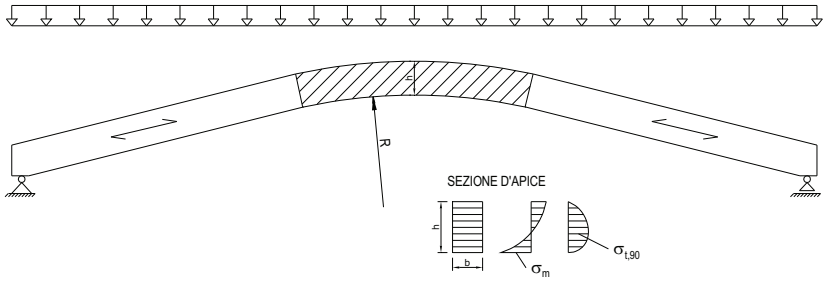


Figura 4.8: Nelle travi curve è opportuno controllare le tensioni di trazione perpendicolare alla fibratura che nascono nel concio centrale della trave ed è necessario non utilizzare raggi di curvatura troppo piccoli.

La viscosità e le deformazioni differite

Come molti altri materiali, il legno è un materiale viscoelastico e la principale conseguenza di questo è l'aumento della freccia delle travi inflesse nel tempo.
Anche nel calcestruzzo armato è presente tale fenomeno, tuttavia il problema è meno sentito in quanto sia il materiale (più rigido del legno) che le tipologie strutturali (iperstatiche) portano a deformazioni iniziali molto basse e quindi l'aumento delle deformazioni generalmente non è un problema; nel caso delle strutture di legno il materiale (meno rigido del c.a.) e le tipologie strutturali (generalmente isostatiche o a bassa iperstaticità) portano a deformazioni iniziali importanti e l'aumento nel tempo di queste è un problema che il progettista non può trascurare.
Da tener presente che solo i carichi che agiscono permanentemente sulla struttura danno origine ad aumento di deformazione nel tempo, non i carichi che agiscono per brevi periodi.
L'aumento di deformazione nel tempo si riscontra solo nei primi anni successivi alla messa in carico dell'elemento.
I carichi che agiscono permanentemente sulla struttura generalmente sono il peso proprio, il carico permanente portato e una quota parte dei carichi accidentali (d'uso) che mediamente sono sempre presenti sulla struttura.
Il fenomeno della viscosità è maggiormente sentito negli elementi posti in opera umidi e che stagionano sotto carico.
Per elementi già in opera che hanno già subìto l'aumento di deformazione nel tempo, il fenomeno può ripartire manifestando ulteriore deformazione se l'elemento viene sufficientemente bagnato e si riasciuga sotto carico, (prescindendo dai fenomeni di degrado). Questo comportamento del legno fa parte delle caratteristiche meccano-sorbitive del materiale. Il comportamento meccano-sorbitivo si manifesta quando subisce delle variazioni di umidità e/o temperatura mentre è anche sollecitato meccanicamente.

Figura 4.9: Deformazioni su una copertura di legno.

La deformabilità dei giunti

I giunti meccanici nelle strutture di legno generalmente non possono essere considerati rigidi.

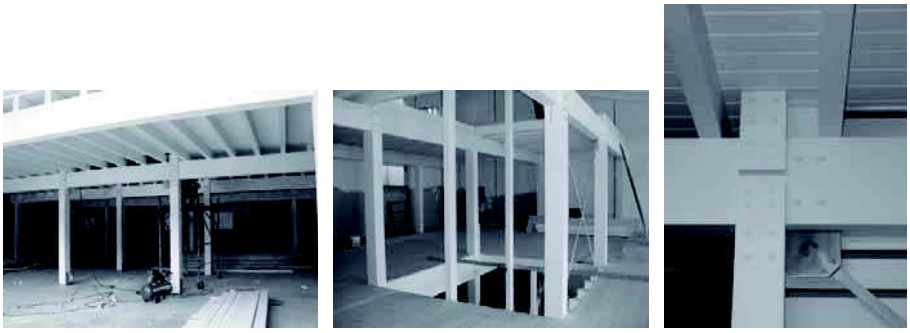


Figura 4.10: Nelle immagini, un sistema a travi e pilastri. Le connessioni bullonate non possono assicurare la rigidezza alla rotazione dei giunti, pertanto il sistema ha necessità di essere controventato con croci di S. Andrea. (Foto Valerio Rao).

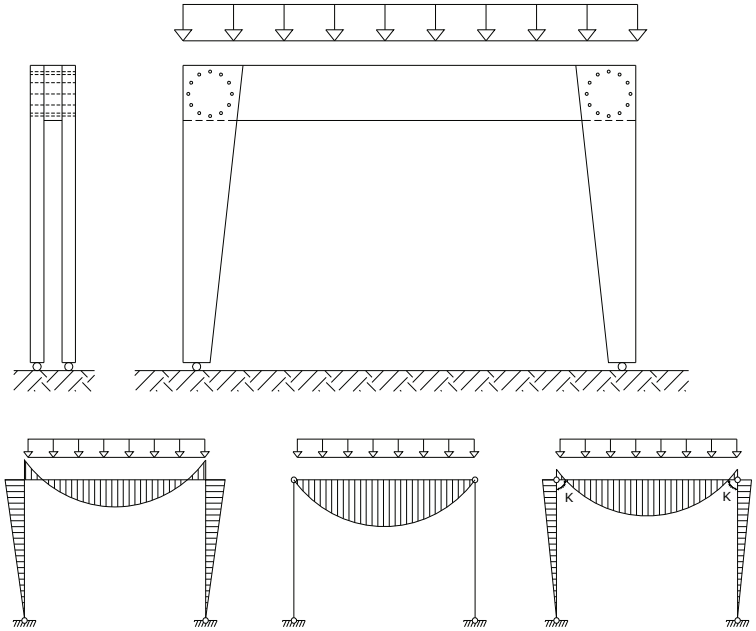


Figura 4.11: il funzionamento del portale a nodi semirigidi è compreso fra i due casi limite: giunti rigidi e cerniere (prescindendo dalla labilità di quest'ultimo).

La spinta nelle strutture di legno

Il legno è per sua natura vocato per la costruzione di tetti mediante l'utilizzo di travi inclinate, è qui che il sistema strutturale può dare origine a spinte.
Il fatto che una trave sia inclinata non significa necessariamente che essa dia spinta orizzontale sui muri di appoggio.
Negli esempi si assume che agli appoggi non ci sia attrito.

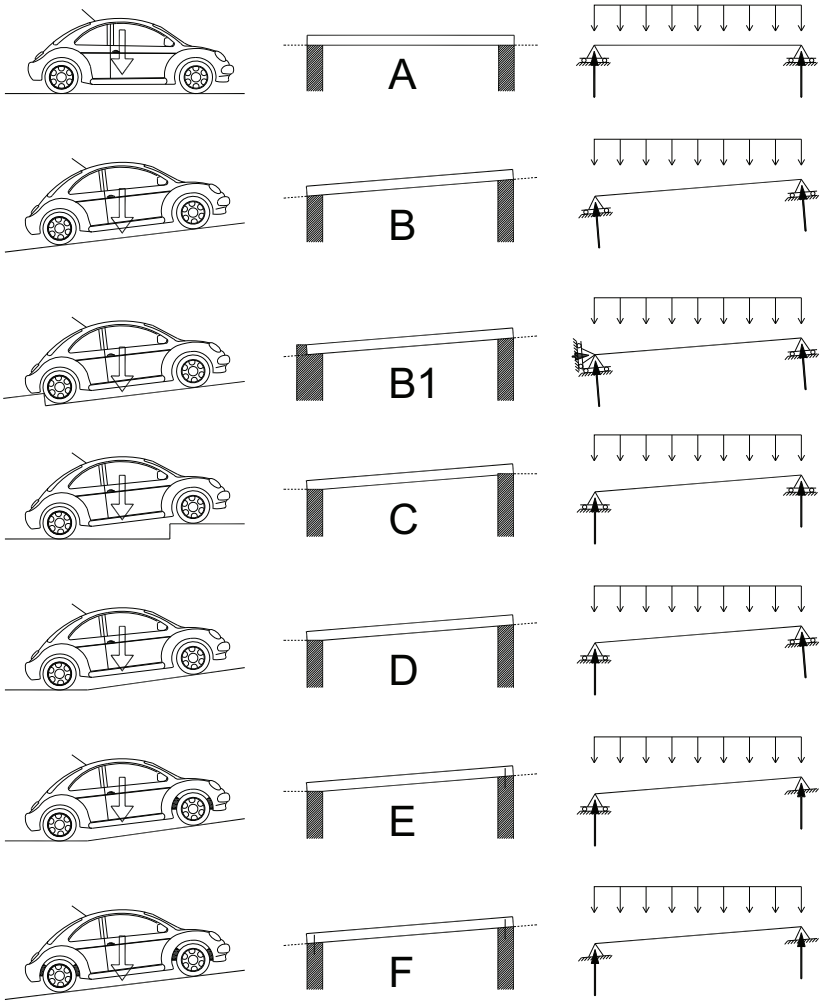


Figura 4.12:

A) La trave è orizzontale, vincolata con carrelli a reazione verticale, non ci sono componenti orizzontali e quindi è in equilibrio e non è spingente.

B) La trave è inclinata, vincolata con carrelli a reazione inclinata, non ci può essere l'equilibrio in quanto non sono equilibrate le componenti orizzontali delle reazioni vincolari, quindi non è in equilibrio e tende a scivolare verso sinistra.

B1) La trave è inclinata, vincolata con carrelli a reazione inclinata, tuttavia all'appoggio basso la testa della trave può contrastare contro il muro, il contrasto con il muro determina una spinta sub-orizzontale che ripristina l'equilibrio alla traslazione orizzontale, il sistema è spingente ma è in equilibrio.

C) La trave è inclinata, vincolata con carrelli a reazione verticale, non ci sono componenti orizzontali e quindi è in equilibrio e non è spingente.

D) La trave è inclinata, vincolata con carrelli uno a reazione orizzontale ed uno a reazione inclinata, non ci può essere l'equilibrio in quanto non è equilibrata la componente orizzontale della reazione del vincolo di destra, quindi non è in equilibrio e tende a scivolare verso sinistra. L'equilibrio ci sarebbe se la testa sinistra della trave potesse contrastare al muro come nel caso B1 e darebbe spinta orizzontale.

E) La trave è inclinata, vincolata da un lato con carrello a reazione orizzontale dall'altro con cerniera (appoggio più spinotto) in grado di dare reazione in ogni direzione, il sistema è in equilibrio e non è spingente in quanto non nascono forze orizzontali. Nel caso dell'analogia con l'automobile le ruote anteriori sono frenate.

F) La trave è inclinata, vincolata da ambedue i lati con cerniera (appoggio più spinotto) in grado di dare reazione in ogni direzione, il sistema è in equilibrio e non è spingente in quanto non nascono forze orizzontali. Nel caso dell'analogia con l'automobile le ruote sono tutte frenate.

CRITERI DI CALCOLO

Lo scopo di questo paragrafo è quello di dare le nozioni fondamentali di calcolo, senza volersi addentrare in tutte le formule specifiche per i vari casi di sollecitazione rimandando ai testi in bibliografia per ulteriori approfondimenti. Verranno in questa sede esposti i principi di calcolo secondo l'Eurocodice 5 (UNI EN 1995-1-1:2004 e le CNR/DT 206:2007)
Il calcolo delle strutture di legno è per certi versi molto più semplice rispetto a quello delle strutture in cemento armato o in acciaio. Occorre però prestare molta attenzione ad alcuni aspetti peculiari del "materiale" legno che è necessario conoscere per evitare errori che possono avere conseguenze catastrofiche.
Il formato di verifica è quello tipico delle verifiche agli Stati Limite, cioè separando le incertezze sui carichi agenti dalle incertezze sulla resistenza dei materiali, si introducono fattori di sicurezza moltiplicativi γ_A per il valore nominale dei carichi e fattori di sicurezza γ_R riduttivi per il valore caratteristico delle resistenze dei materiali.

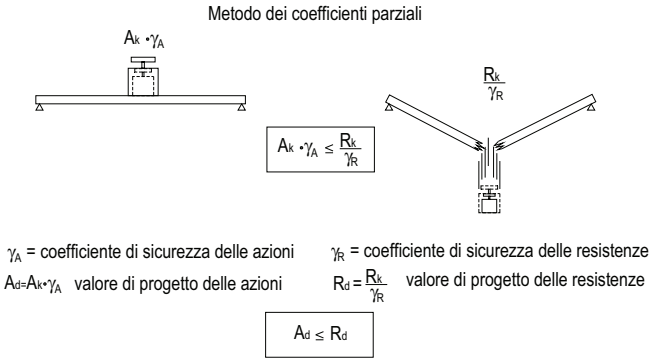

Metodo dei coefficienti parziali
$A_k \cdot \gamma_A$
$\frac{R_k}{\gamma_R}$
$A_k \cdot \gamma_A \le \frac{R_k}{\gamma_R}$
γ_A = coefficiente di sicurezza delle azioni
γ_R = coefficiente di sicurezza delle resistenze
$A_d = A_k \cdot \gamma_A$ valore di progetto delle azioni
$R_d = \frac{R_k}{\gamma_R}$ valore di progetto delle resistenze
$A_d \le R_d$

Figura 4.13: Formato delle verifiche agli Stati Limite.

Per il legno però, a differenza di altri materiali, nel ricavare il valore di progetto delle resistenze occorre moltiplicare per un ulteriore coefficiente di modificazione delle resistenze per tener conto di alcuni "aspetti particolari" del materiale, per cui il formato della verifica diventa il seguente:

$$A_d = \gamma_A A_k \le R_d = \frac{k_{mod} R_k}{\gamma_R}$$

dove:

- A_d è il valore di progetto delle azioni;
- A_k è il valore caratteristico delle azioni. Le azioni vanno ricavate dai relativi capitoli della normativa (Capp. 2 e 3 delle Norme Tecniche oppure Eurocodice 0, EN1990, e Eurocodice 1, EN1991 ove non in contrasto con le Norme Tecniche);
- γ_A è il coefficiente parziale amplificativo delle azioni (secondo la normativa italiana 1,4 per i pesi propri e i carichi caratteristici[1] e 1,5 per i carichi variabili principali);
- k_{mod} coefficiente di modificazione delle resistenze;
- R_d è il valore di progetto delle resistenze;
- R_k è il valore caratteristico delle resistenze. Per le caratteristiche fisiche (massa volumica) e meccaniche (proprietà di resistenza e di rigidezza) del legno si deve fare riferimento a due distinti documenti: la UNI EN 338 "Legno strutturale - Classi di resistenza" per il legno massiccio e la UNI EN 1194 "Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici" per il legno lamellare incollato;
- γ_R è il coefficiente parziale riduttivo delle resistenze (per il legno e i materiali a base di legno varia da 1,4 a 1,5 secondo le Norme Tecniche);

In entrambi i documenti citati le caratteristiche sono definite dalla classe di resistenza. Nel caso del legno massiccio sono previste le seguenti classi:

- conifere e pioppo: C14, C16, C18, C22, C24, C27, C30, C35, C45 e C50;
- altre latifoglie: D30, D35, D40, D50, D60 e D70.

Nel caso del legno lamellare incollato sono previste le seguenti classi:

- legno lamellare omogeneo: GL24h, GL28h, GL32h e GL36h;

[1] Nel DM 14/01/2008 tale coefficiente è stato sdoppiato in due valori diversi, rispettivamente pari a 1,3 e 1,5, distinguendo fra carichi permanenti strutturali e carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati).

- legno lamellare combinato (cioè formato da lamelle di qualità peggiore all'interno e di qualità migliore agli estremi superiore ed inferiore): GL24c, GL28c, GL32c e GL36c.

Il numero presente nella identificazione delle classi indica la resistenza caratteristica a flessione della classe (frattile 5%). Ad ogni classe di resistenza corrisponde un "profilo di caratteristiche meccaniche", in Tabella 4.5, Tabella 4.6 e Tabella 4.7 si riporta il profilo delle resistenze rispettivamente secondo la UNI EN 338[2] e la UNI EN 1194.

		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Proprietà di resistenza in N/mm²													
Flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Taglio	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8
Proprietà di rigidezza in kN/mm²													
Modulo di elasticità medio parallelo	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	12	12	13	14	15	16
Modulo di elasticità caratteristico	E_k	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	8,0	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Modulo di elasticità medio perp.	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,40	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,75	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica in kg/m³													
Massa volumica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Massa volumica media	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Tabella 4.5: Profili resistenti e caratteristici delle varie classi di resistenza di legno massiccio di conifera così come individuate nella norma EN 338.

		D30	D35	D40	D50	D60	D70
Proprietà di resistenza in N/mm²							
Flessione	$f_{m,k}$	30	35	40	50	60	70
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	18	21	24	30	36	42
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	23	25	26	29	32	34
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
Taglio	$f_{v,k}$	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
Proprietà di rigidezza in kN/mm²							
Modulo di elasticità medio parallelo	$E_{0,mean}$	10	10	11	14	17	20
Modulo di elasticità parallelo	E_k	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
Modulo di elasticità medio perp.	$E_{90,mean}$	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
Massa volumica in kg/m³							
Massa volumica	ρ_k	530	560	590	650	700	900
Massa volumica media	ρ_{mean}	640	670	700	780	840	1080

Tabella 4.6: Profili resistenti e caratteristici delle varie classi di resistenza di legno massiccio di latifoglia così come individuate nella norma EN 338.

[2] La norma EN 338 è attualmente in fase di revisione e le classi indicate potranno essere modificate nella nuova versione.

		GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
Proprietà di resistenza in N/mm²									
Flessione	$f_{m,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	0,40	0,45	0,50	0,60	0,35	0,40	0,45	0,50
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
Taglio	$f_{v,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
Proprietà di rigidezza in kN/mm²									
Modulo di elasticità medio parallelo	$E_{0,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
Modulo di elasticità parallelo	E_k	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
Modulo di elasticità medio perp.	$E_{90,mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
Massa volumica in kg/m³									
Massa volumica	ρ_k	380	410	430	450	350	380	410	430

Tabella 4.7: Classi di resistenza per legno lamellare incollato di conifera secondo UNI EN 1194

Per capire meglio il significato delle tabelle occorre considerare il comportamento del materiale. Il legno è un tessuto vegetale composto in prevalenza da cellule di forma allungata e fusiforme che, nell'albero in piedi, sono per la maggior parte allineate secondo la direzione del fusto, e presentano una buona resistenza a trazione e a compressione lungo la loro direzione longitudinale e resistenze meccaniche molto inferiori in direzione trasversale. La marcata anisotropia a livello cellulare si conserva anche a livello macroscopico, per cui le caratteristiche di resistenza del legno in direzione parallela alla fibratura (ossia nella direzione di sviluppo prevalente delle cellule) sono notevolmente maggiori di quelle misurate in direzione perpendicolare alla fibratura. Un'analogia che serve a comprendere bene questo concetto è quella del pacco di spaghetti. Se prendiamo un pacco di spaghetti, immaginando, con un certo sforzo di fantasia, che ogni singolo spaghetto sia una singola cellula allungata o fibra, e proviamo a sollecitarlo nelle varie direzioni, possiamo comprendere meglio il comportamento del materiale legno e quindi i profili delle resistenze indicati nelle tabelle.

- Provando a far scorrere la parte superiore sopra quella inferiore ci rendiamo conto che la resistenza allo scorrimento è piuttosto bassa. Infatti il legno, sollecitato a **taglio** ($f_{v,k}$ nelle tabelle) mostra dei valori di resistenza non molto elevati.
- Provando a comprimere il pacco di spaghetti in direzione longitudinale osserviamo una buona resistenza. Il legno infatti, sollecitato a **compressione parallela** alla fibratura ($f_{c,0,k}$ nelle tabelle, dove c sta per compressione e 0 è l'angolo fra la direzione della sollecitazione e la direzione della fibratura) mostra dei buoni valori di resistenza.
- Provando a schiacciare il pacco di spaghetti in direzione trasversale notiamo che gli spaghetti offrono poca resistenza. Allo stesso modo il legno sollecitato a **compressione perpendicolare** rispetto alla fibratura ($f_{c,90,k}$ nelle tabelle, dove c sta per compressione e 90 è l'angolo fra la direzione della sollecitazione e la direzione della fibratura) mostra dei valori di resistenza molto più bassi rispetto alla stessa sollecitazione in direzione parallela (da circa 1/10 a circa 1/4, come si osserva nelle tabelle).
- Provando a tirare gli spaghetti in direzione longitudinale notiamo una ottima resistenza. Parallelamente il legno sollecitato a **trazione parallela** rispetto alla fibratura ($f_{t,0,k}$ nelle tabelle, dove t sta per trazione e 0 è l'angolo fra la direzione della sollecitazione e la direzione della fibratura) mostra degli ottimi valori di resistenza.
- Provando a tirare gli spaghetti in direzione trasversale notiamo che la resistenza è nulla e il pacco di spaghetti si apre facilmente. La sollecitazione a **trazione perpendicolare** alla fibratura ($f_{t,90,k}$ nelle tabelle, dove t sta per trazione e 90 è l'angolo fra la direzione della sollecitazione e la direzione della fibratura) è infatti il punto debole. Occorre fare particolare attenzione nella progettazione a tutte quelle situazioni in cui si verifica l'insorgere di tensioni di trazione ortogonale alla fibratura, perché possono portare a collassi repentini e con effetti catastrofici (si veda quanto detto in precedenza a proposito).

- Infine provando a far scorrere gli spaghetti in direzione trasversale notiamo che la resistenza è molto bassa e che gli spaghetti tendono a scorrere uno sull'altro. La resistenza a **taglio per rotolamento** è infatti molto bassa nel legno. Nelle tabelle dei profili resistenti del legno tale stato di sollecitazione non è riportato; tuttavia sia all'interno dell'Eurocodice 5 che delle CNR/DT viene specificato che tale resistenza può essere assunta al massimo pari al doppio del corrispondente valore di trazione ortogonale alla fibratura.

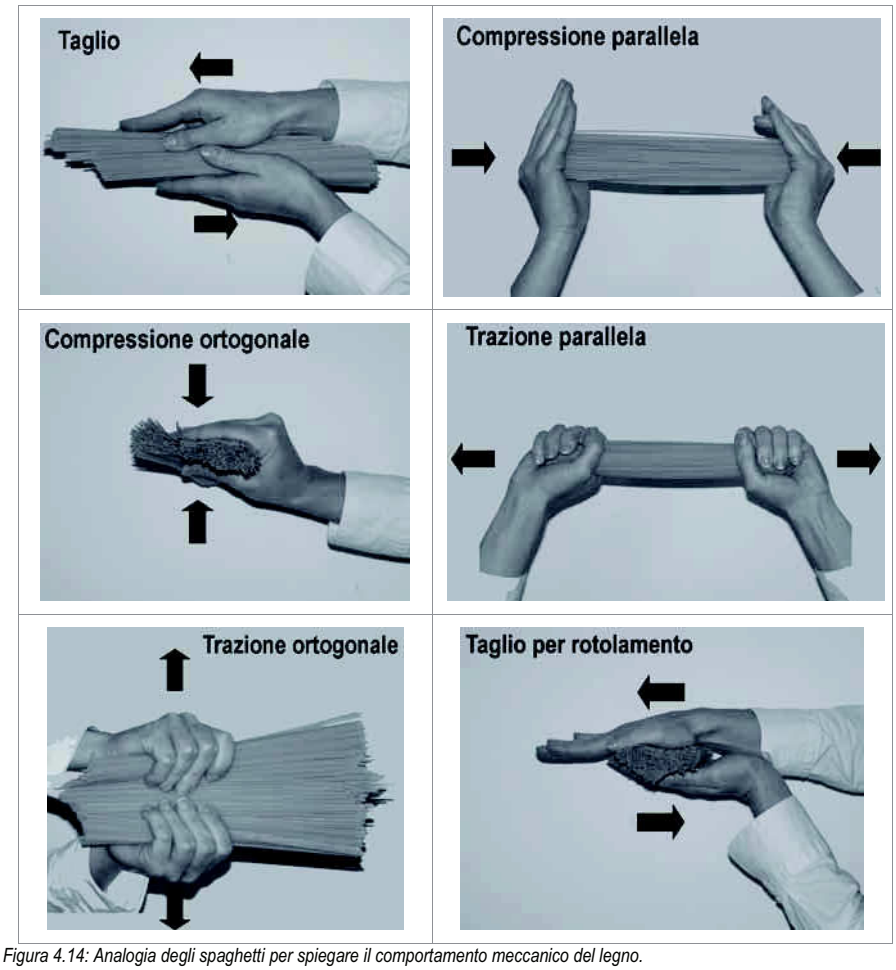


Figura 4.14: Analogia degli spaghetti per spiegare il comportamento meccanico del legno.

Lo strumento delle classi di resistenza, molto utili al progettista che, in funzione delle esigenze derivanti dalla progettazione, può ordinare ad esempio un elemento di legno di classe C24 o C30, analogamente a quanto farebbe con il calcestruzzo tipo di classe C25-30 o C30-35, può sembrare strano per il legno. Infatti, parlando di legno massiccio, noi siamo abituati a sentire parlare di specie legnose (ad es. abete rosso, castagno, larice, quercia), di provenienza (ad es. Austria, Germania, Nord Italia, Italia Centrale) e di categoria di qualità resistente determinata in base alla entità dei difetti presenti e secondo una data norma di classificazione (in Italia è tuttora molto utilizzata la norma tedesca DIN 4074, che classifica, per ogni specie legnosa gli elementi in tre classi denominate S7, S10 e S13. Si veda a tale proposito il §2.4). Infatti in realtà un tipo di legno è individuato dalle seguenti caratteristiche:

1. specie legnosa;
2. provenienza;
3. categoria.

Quindi, più che legno massiccio di classe C24, appare più logico dire ad es. trave di abete rosso dell'Austria classificato in categoria S10 secondo la norma tedesca DIN 4074. E tutto questo effettivamente è corretto. Il progetto di una struttura di legno non deve infatti limitarsi ai risultati che provengono dal calcolo, ma il progettista

deve anche decidere quale specie legnosa è più adatta in funzione delle condizioni di esposizione della struttura, delle caratteristiche di durabilità dell'opera e della disponibilità del fornitore del materiale e della zona di provenienza dello stesso materiale. Ma come si conciliano allora le classi di resistenza con i tipi di legno?
Esiste una norma che rimette tutto a posto. La UNI EN 1912 *Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie e specie legnose* fornisce l'equivalenza fra le classi di resistenza citate nella UNI EN 338 e la terna *specie legnosa / provenienza / categoria*, riferita a vari sistemi di classificazione nazionali; nella EN 1912 in vigore ad oggi non sono contemplate le provenienze italiane.
Per il legno di provenienza italiana esiste la norma italiana di classificazione UNI 11035 "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale italiani" che fornisce non solo le regole di classificazione ma anche le caratteristiche meccaniche.
A titolo d'esempio, si riporta in Tabella 4.8 un estratto della UNI EN 1912.

classe di resistenza secondo EN 338	**categoria (norma nazionale)**	**specie legnosa**	**provenienza**
C30	ST-I (Francia)	Abete bianco e rosso, Pini	Francia
	S13 (Germania)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre, Larice	Europa centrale, del nord e dell'est
	S13 (Germania)	Douglasia	Germania
	T3 (Paesi nordici)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre, Larice	Europa del nord e del nord-est
	J&P Sel (USA) SLF Sel (USA)	Pino pece	USA
C24	G.BH (Austria)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre, larice	Europa centrale, del nord e dell'est
	ST-II (Francia)	Abete bianco e rosso, Douglasia, Pini, Pioppo	Francia
	S10 (Germania)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre, Larice	Europa centrale, del nord e dell'est
	S10 (Germania)	Douglasia	Germania
	T2 (Paesi nordici)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre, Larice	Europa del nord e del nord-est
	B (Olanda)	Abete bianco e rosso	Europa del nord e centrale
	SS (Regno Unito)	Pino del Paranà	Brasile
	SS (Regno Unito)	Abete bianco e rosso, Pino silvestre	Europa centrale, del nord e dell'est
	SS (Regno Unito)	Douglasia, Larice	USA e Canada
	SS (Regno Unito)	Pino pece	USA
	SS (Regno Unito)	Pino pece	Caraibi
	J&P Sel (USA) SLF Sel (USA)	Douglasia, Larice	USA e Canada

Tabella 4.8: Assegnazione delle categorie e specie legnose alle classi di resistenza per legno strutturale secondo EN 1912.

Il sistema delle classi di resistenza presenta il vantaggio di raggruppare in una stessa classe omogenea per caratteristiche meccaniche diversi *tipi di legno* ciascuno definito dalla terna *specie legnosa / provenienza / categoria*. Al momento della redazione del progetto il progettista sceglie la classe di resistenza del materiale strutturale, la prescrive nel capitolato di fornitura, così come farebbe con il calcestruzzo o con l'acciaio, sarà poi cura del fornitore procurare il materiale classificato appartenente alla classe richiesta, potendo scegliere, secondo le indicazioni dello stesso progettista, fra diversi tipi di legno a seconda delle opportunità del mercato.

C'è anche un altro aspetto da considerare nelle verifiche strutturali che, nelle verifiche agli Stati Limite, semplifica notevolmente il calcolo per il caso del legno rispetto ad altri materiali come il cemento armato e l'acciaio: la verifica si fa in termini di tensioni (come nel metodo delle Tensioni Ammissibili) e non di caratteristiche di sollecitazione.
Questo perché il legno strutturale, ossia gli elementi di legno in dimensione d'uso nelle strutture (ad es., per fare un caso concreto, una trave di abete di sez. 15x20 cm e lunghezza 4,00 m), presentano un comportamento a rottura di tipo fragile, ossia con un legame elastico lineare fino a rottura tra tensioni e deformazioni.
La stessa cosa non è vera per il legno netto, ossia per un piccolo campione di legno esente da difetti (ad es. per fare un caso concreto, un piccolo pezzo di abete di sezione 1,5x1,5 cm e lunghezza 10 cm), senza nodi e con la

fibratura perfettamente diritta, (cosa possibile per un elemento di piccole dimensioni in quanto la possibilità di trovare un difetto come. nodi o deviazioni di fibratura aumenta all'aumentare delle dimensioni dell'elemento considerato). Un campione di legno netto se sottoposto ad es. ad una prova a flessione, al crescere della sollecitazione, superato il limite elastico, avrà dapprima la plasticizzazione delle fibre compresse all'estradosso e infine la rottura sul lembo teso all'intradosso, dopo un certo tratto di plasticizzazione.
Ma nel legno strutturale, dovendo fare riferimento per le resistenze ai valori caratteristici, ossia al frattile 5% inferiore della curva delle resistenze, e quindi sostanzialmente agli elementi più difettosi, la presenza di un difetto determinerà un comportamento dell'elemento, se sottoposto alla stessa prova a flessione, di tipo sostanzialmente fragile, con la rottura dell'elemento a trazione sul lembo teso prima che si possa manifestare la plasticizzazione delle fibre sul lembo compresso.

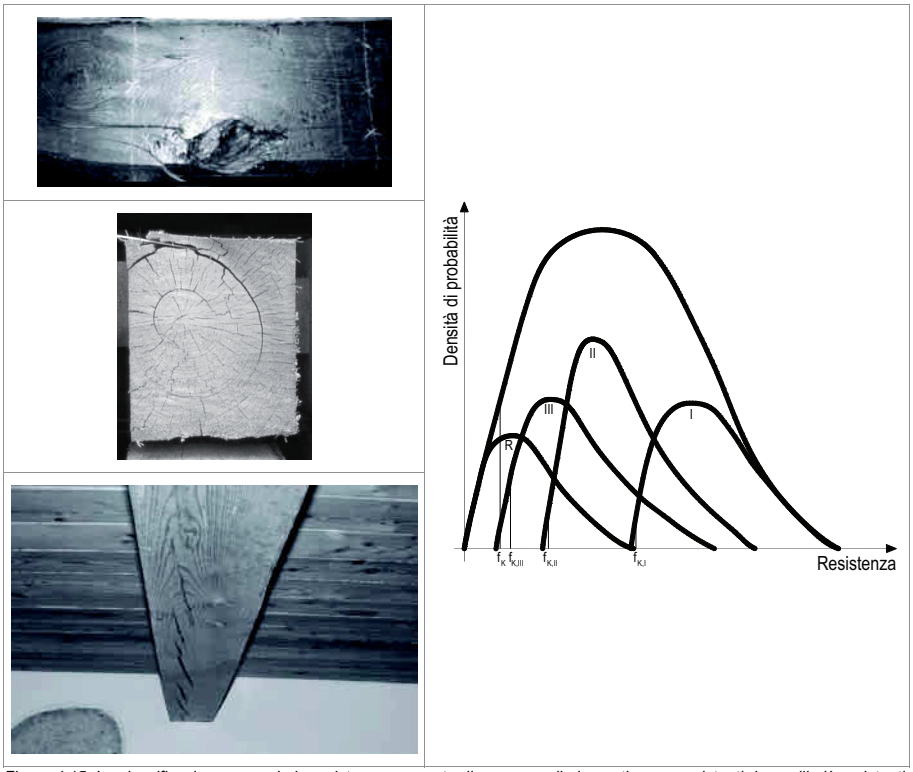
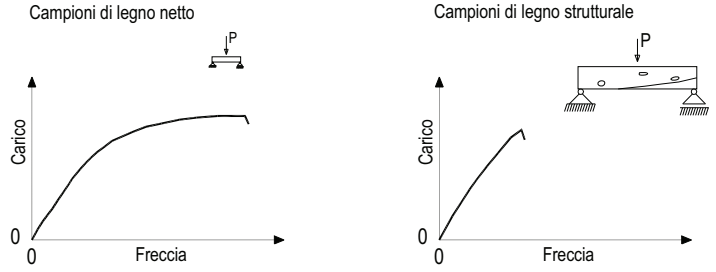


Figura 4.15: La classificazione secondo la resistenza consente di separare gli elementi meno resistenti da quelli più resistenti. Classificando in categorie di qualità resistente, in base al tipo ed entità dei difetti presenti (ad es. dimensioni dei nodi, inclinazione della fibratura) è possibile separare il legname in funzione della sua resistenza. Le regole di classificazione sono diverse da paese a paese perché generalmente "calibrate" sui legni di produzione locale. I difetti che maggiormente incidono sulla resistenza sono comunque nodi ed inclinazione della fibratura, alcuni tipi di fessurazione, eccetera. Per ciascun tipo di legno (specie legnosa, provenienza, categoria), dopo una metodica ed estesa campagna di prove a rottura su elementi in dimensioni d'uso (vedi Giordano, 1999, cap. 4), è possibile determinare la distribuzione delle resistenze che compete a ciascuna categoria e determinarne il valore caratteristico al frattile 5% (sopra: si sono individuate tre categorie, I,II,III ed R, quest'ultima comprendente gli elementi rifiutati). Come si può vedere dal diagramma le regole di classificazione non sono efficienti al 100% giacché non consentono di collocare tutti i pezzi migliori nella categoria più alta e i pezzi peggiori tutti nella categoria più bassa. Tuttavia le regole di classificazione sono essenziali perché consentono comunque di individuare valori diversi e scalati di resistenze di riferimento utili per il calcolo, e quindi di avere un progetto più efficiente. Si noti che la parte di coda a sinistra delle distribuzione di resistenza è pressoché tronca: il che vuol dire che con il legno, una volta classificato, si hanno possibilità molto remote di incappare in resistenze più basse di quelle previste.



(da Stieda 1986)

Figura 4.16: Differenza di comportamento a rottura di campioni in piccole dimensioni di legno senza difetti, e di campioni in dimensioni d'uso di legno strutturale. Si nota un deciso comportamento lineare fino a rottura, tanto più accentuato e frequente quanto più il materiale è di minor resistenza.

Pertanto, sostanzialmente, sono due le tipologie base di verifica: una per la verifica degli elementi strutturali e delle sezioni lignee ed un'altra per la verifica dei collegamenti. La prima viene fatta sulle tensioni, la seconda sugli sforzi, come illustrato qui di seguito.

Verifica degli elementi strutturali

Dovrà essere verificato che per la sezione generica sia:

$$\sigma_d \leq f_k \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

dove:

- σ_d è la tensione agente di progetto, calcolata a partire dallo schema statico e dai carichi nominali agenti aumentati dei coefficienti parziali di sicurezza γ loro spettanti nonché dei coefficienti di combinazione ψ_0, ψ_1, ψ_2 delle azioni, che sono indipendenti dal materiale con cui è costruita l'opera (acciaio, legno, c.a., etc.).
- fk rappresenta la resistenze caratteristica al frattile 5% del materiale secondo i diversi tipi di tensione a seconda della natura e della loro direzione rispetto a quella della fibratura.
- k_{mod} è il coefficiente di modificazione delle resistenze.
- γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale.

Proprietà di resistenza	
Flessione	($f_{m,k}$)
Trazione parallela	($f_{t,0,k}$)
Trazione perpendicolare	($f_{t,90,k}$)
Compressione parallela	($f_{c,0,k}$)
Compressione perpendicolare	($f_{c,90,k}$)
Taglio	($f_{v,k}$)

Proprietà di rigidezza	
Modulo elastico parallelo medio	($E_{0,mean}$)
Modulo elastico parallelo caratteristico	($E_{0,05}$)
Modulo elastico perpendicolare medio	($E_{90,mean}$)
Modulo elastico tangenziale medio	(G_{mean})

Massa volumica	
Massa volumica caratteristica (5%)	(ρ_k)
Massa volumica media	(ρ_{mean})

Tabella 4.9: Proprietà di resistenza (secondo natura ed inclinazione rispetto alla fibratura), rigidezza e massa volumica, e relativa simbologia.

Le f_k vengono fornite al progettista non nella norma, ma in apposite norme UNI-EN, sotto forma di classi di resistenza sia per il legno massiccio che per il legno lamellare (Tabella 4.5, Tabella 4.6, Tabella 4.7).

In particolare si può osservare che:

- come detto in precedenza e come si evince dalla formula sopra riportata, la verifica della sezione si fa sulle tensioni e non sulle azioni interne;
- per il legno massiccio sarà possibile attribuire un tipo di legno (specie, provenienza, categoria resistente) ad una classe di resistenza (Tabella 4.8). Per i legnami italiani ci si riferisce alla Norma UNI

11035 "Legno Strutturale - Classificazione - Requisiti generali, regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e valori caratteristici per tipi di legname italiani";

- γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza sul materiale che serve per passare dalla resistenza al frattile 5% a quella di progetto (nominalmente definita "al 5‰").
  A questo proposito, è interessante notare quanto segue. Esistono delle motivazioni scientifiche ben precise in base alle quali vengono calcolati i coefficienti di sicurezza sui materiali. Nel caso del calcestruzzo ad esempio (γ_M=1,6) si arriva alla resistenza di progetto, attraverso il prodotto dei seguenti coefficienti:
  - 1,1 per l'incertezza sul modello di calcolo,
  - 1,1 per l' incertezza sulla corrispondenza tra provini cubici e cls in opera,
  - 1,32 per il passaggio dal frattile 5% al frattile 5‰ in caso di distribuzione "normale" delle resistenze.

  Nel caso del legno, invece si hanno i corrispondenti seguenti coefficienti:
  - 1,1 per l'incertezza sul modello di calcolo,
  - 1,0 perché ogni elemento è classificato e marchiato,
  - 1,18 legno massiccio e 1,14 legno lamellare, essendo "asimmetrica" la distribuzione delle resistenze (Figura 4.15)

  In definitiva, moltiplicando i tre valori, avremo (Tabella 4.10):
  - γ_M = 1,3 per legno massiccio,
  - γ_M = 1,25 per legno lamellare.

Materiale	γ_M
Legno massiccio	1,30
Legno lamellare	1,25
LVL, compensato, OSB, pannelli di particelle e di fibre	1,20
Altri materiali a base di legno	1,30
Connessioni	1,30

Tabella 4.10: Coefficienti di sicurezza parziali per le proprietà dei materiali (γ_M) secondo l'Eurocodice 5 (UNI EN 1995-1-1).

In Italia però i coefficienti di sicurezza presenti nell'Eurocodice 5 (e in tutti gli altri paesi europei) non si possono applicare ma occorre applicare, quelli definiti nelle Norme Tecniche (DM 14/01/2008) e confermati nel successivo Decreto del Ministero Infrastrutture e Trasporti del 6/5/2008

Stati limite ultimi	γ_M
- Combinazioni fondamentali	
Legno massiccio	1,50
Legno lamellare	1,45
Pannelli di particelle o di fibre	1,50
Compensato, pannelli di scaglie orientate (OSB)	1,40
Unioni	1,50
-Combinazioni eccezionali	1,00

Tabella 4.11: Coefficienti di sicurezza parziali per le proprietà dei materiali (γ_M) applicabili in Italia secondo le Norme Tecniche (DM 14/01/08).

Questo ingiusta penalizzazione del materiale (che comporterà sostanzialmente un sovradimensionamento delle strutture di legno) pone il legno nel nostro paese in una posizione di svantaggio nei confronti degli altri materiali da costruzione rispetto a tutto il resto d'Europa. Ma bisogna vedere anche il rovescio positivo della medaglia: per anni in Italia abbiamo sofferto della mancanza di una apposita norma per la progettazione delle strutture di legno. Adesso abbiamo una norma in linea con le normative di altri paesi con una maggiore tradizione nella progettazione e costruzione delle strutture di legno; la penalizzazione dei coefficienti di sicurezza è determinata proprio dalla mancanza di fiducia in un materiale che nel nostro paese ha una tradizione costruttiva recente per le nuove strutture. Ma questo non deve preoccupare, passato qualche anno passeranno anche le diffidenze del normatore e ci allineeremo sui valori utilizzati nel resto d'Europa.

- k_{mod} è il coefficiente di modificazione che tiene conto dell'effetto sui parametri di resistenza sia della durata del carico sia dell'umidità della struttura, in quanto la resistenza del legno diminuisce all'aumentare della durata del carico ed anche all'aumentare dell'umidità del legno.

  Le resistenze f_k del legno in generale sono riferite a prove che portano alla rottura dell'elemento ligneo in un tempo pari a 5 minuti. Fatta 1 tale resistenza, se il legno viene sollecitato con un carico superiore ad 1 esso resisterà per un tempo inferiore ai 5 minuti, se viene sollecitato con un carico superiore a circa 0,5 è destinato a raggiungere la rottura in un tempo più o meno lungo, se viene sollecitato con un carico inferiore a 0,5 non raggiungerà mai la rottura. In condizioni di carico in esercizio per una trave di legno le tensioni sollecitanti sono pari a circa il 20% dei corrispondenti valori di rottura per cui siamo ben lontani dal limite del 50%.

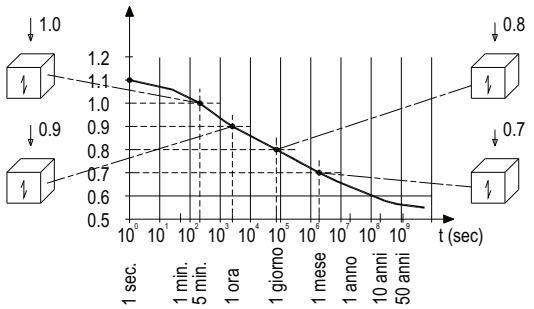


Figura 4.17: Influenza della durata del carico sui parametri di resistenza, secondo l'Eurocodice 5. Supponendo di avere 4 cubetti di legno esattamente uguali, si sottopone il primo ad una prova di rottura a compressione parallela alla fibratura. Le prove di resistenza, mediante le quali si determinano i valori di resistenza caratteristica devono avere una durata di 5 min. Fatto 1 il carico che ha portato a rottura il cubetto in 5 minuti, se sottoponiamo un secondo cubetto ad un carico pari a 0,9 questo si romperà dopo 1 ora, sottoponendo un terzo cubetto ad un carico pari a 0,8 questo si romperà dopo 1 giorno, sottoponendo un quarto cubetto ad un carico pari a 0,7 si romperà dopo 1 mese. La curva ha andamento asintotico per cui sottoponendo un eventuale quinto cubetto ad un carico pari a 0,5, questo non si romperà mai. Il limite del 50% è detto limite di scorrimento, e al di sotto non c'è danneggiamento interno del materiale se sottoposto a carichi prolungati. La possibilità di danneggiamenti interni del materiale dovuti all'azione di carichi particolarmente elevati - al di sopra del limite di scorrimento - per tempi di durata ridotta, è tenuta in conto dal coefficiente k_{mod}.

Le norme ci vengono incontro definendo delle classi di durata del carico, ossia durata del periodo di presenza del carico al suo valore caratteristico durante la vita utile della struttura (si sta parlando di valori caratteristici dei carichi, quindi al frattile 95%. In generale sotto i 1000 m di altitudine la neve in Italia è considerato come un carico di breve durata ossia come un carico che al suo "massimo" valore è presente meno di una settimana nella vita della struttura).

Classe di durata del carico	Durata accumulata del carico caratteristico	Esempi di carico
Permanente	più di 10 anni	peso proprio
Lunga durata	6 mesi -10 anni	carico di esercizio nei locali adibiti a deposito
Media durata	1 settimana - 6 mesi	carichi di esercizio in generale
Breve durata	meno di 1 settimana	neve (*)
Istantaneo	--	vento e carichi eccezionali

* In aree dove si registrano elevati carichi di neve per prolungati periodi di tempo è opportuno considerare una parte del carico come carico di media durata.

Tabella 4.12: Classi di durata del carico, durata accumulata del carico caratteristico ed esempi di carico secondo l'Eurocodice 5 e le Norme Tecniche.

Individuate così le classi di durata del carico, ad ogni carico si attribuisce un valore di k_{mod} (Tabella 4.14). Se la combinazione di carico prevede carichi di durata diversa si prende il k_{mod} relativo alla durata più breve. Questo non stupisca. Infatti va tenuto presente che:

- si devono comunque fare le verifiche per tutte le condizioni di carico: solo carichi permanenti, carichi permanenti più un carico di servizio, carichi permanenti più due carichi di servizio con i relativi coefficienti di combinazione, ecc.;

- il danneggiamento non è lineare nel tempo ma esponenziale, cioè il danno maggiore avviene negli ultimi momenti.
- considerare il k_{mod} relativo alla durata del carico più lunga non sarebbe giusto, perché la neve non starà mai a lungo come un carico permanente e quindi il danno eventuale sarà solo parziale.

Riguardo all'umidità, è bene osservare che la diminuzione di resistenza all'aumentare dell'umidità del legno è meno evidente nel legno strutturale che nel legno netto.

Le norme individuano tre classi di servizio:

Classe di servizio 1	È caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20°C e un'umidità relativa dell'aria circostante che non superi il 65%, se non per poche settimane all'anno.
Classe di servizio 2	É caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20°C e un'umidità relativa dell'aria circostante che superi l'85% solo per poche settimane all'anno.
Classe di servizio 3	È caratterizzata da umidità più elevata di quella della classe di servizio 2.

Tabella 4.13: Classi di servizio definite dalle Norme Tecniche.

Al progettista non è richiesta la misurazione strumentale dell'umidità del legno in opera, dato che il legno essendo un materiale igroscopico, si equilibra ad un determinato valore del suo contenuto di umidità in funzione delle condizioni ambientali circostanti. In base a ciò le tre classi sopra definite si riscontrano nelle seguenti condizioni:

1 - al chiuso, riscaldata in inverno (u% < 12)
2 - al chiuso, non riscaldata in inverno; all'aperto, coperta (12<u%<20)
3 - all'aperto, non protetta (u% ≥ 20).

Conoscendo quindi le condizioni in cui la struttura si troverà ad operare e quindi individuando la classe di servizio corrispondente è possibile determinare il valore del coefficiente di modificazione delle resistenze k_{mod} corrispondente al carico di minor durata della combinazione considerata, da applicare per ricavare il valore di progetto della resistenza.
Anche nel caso dei k_{mod}, come nel caso dei coefficienti di sicurezza parziali γ_M nelle Norme Tecniche sono presenti dei valori più severi rispetto a quelli dati dall'Eurocodice 5 (ad es. non si tiene conto del fatto che per carichi di durata istantanea il legno presenta dei valori di resistenza incrementati del 10% rispetto a quelli caratteristici, ossia riferiti a prove di 5 minuti di durata).

Materiale	**Riferimento**		**classe di servizio**	**classe di durata del carico**				
				permanente	**lungo termine**	**medio termine**	**breve termine**	**istantanei**
Legno massiccio Legno lamellare incollato	EN 14081-1 EN 14080		1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
			2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
			3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Compensato	EN 636	P. 1,2,3	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
		P. 2,3	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
		Parte 3	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Pannello di scaglie orientate (OSB)	EN 300	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,00
		OSB/3 – OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,00
			2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Pannello di particelle (truciolare)	EN 312	Parti 4,5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,00
		Parte 5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
		Parti 6,7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,00
		Parte 7	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90
Pannello di fibre, alta densità	EN 622-2	HB, LA, HB.HLA 1 o 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,00
		HB, HLA 1 o 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80
Pannello di fibre, media densità (MDF)	EN 622-3	MBH.LA1 o 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
		MBH.HLS1 o 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
			2	-	-	-	0,45	0,80
	EN 622-3	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
		MDF.HLS	2	-	-	-	0,45	0,80

Tabella 4.14: Valori di k_{mod} secondo le Norme Tecniche (DM 14/01/08).

Le verifiche per stati di tensione composti diventano di facile comprensione, ad esempio, nel caso di tenso-flessione si avrà:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

essendo al numeratore le tensioni di progetto agenti, di trazione parallela alla fibratura e di flessione, rispettivamente, e le corrispondenti tensioni resistenti di progetto al denominatore.

Verifica delle unioni

Per i giunti meccanici (con chiodi, spinotti, bulloni, piastre dentate, ecc.), in cui il comportamento è supposto elasto-plastico a duttilità più o meno accentuata, la verifica si fa sugli sforzi agenti/resistenti, come nell'approccio classico degli stati limite ultimi:

$$S_d \leq R_k \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

S_d è lo sforzo agente di progetto calcolato a partire dallo schema statico e dai carichi nominali agenti aumentati dei coefficienti parziali di sicurezza γ_A loro spettanti, con i relativi fattori di combinazione ψ_0, ψ_1, ψ_2.

k_{mod} è il coefficiente che tiene conto delle condizioni di servizio (umidità del legno) e della "durata del carico"

γ_M è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale.

Le R_k vengono fornite attraverso formule derivate da quelle di Johansen (1949), qui non riportate per brevità, ognuna delle quali basata sull'ipotesi di un preciso modo di rottura della sezione. L'effetto di più elementi di collegamento allineati viene tenuto in conto attraverso appositi coefficienti riduttivi che tengono conto che la resistenza di un gruppo di *n* elementi di collegamento allineati è inferiore a *n* volte la resistenza del singolo elemento di collegamento.
Anche nel caso delle giunzioni meccaniche possono esserci degli ulteriori coefficienti che riducono la resistenza in funzione del numero di elementi meccanici di collegamento in fila, ecc.
In generale nel calcolo della resistenza rientrano i seguenti parametri:

- la geometria;
- il momento di snervamento degli elementi metallici di collegamento;
- la resistenza a rifollamento del legno (legata alla massa volumica caratteristica ρ_k);
- la tensione di taglio del legno;
- il probabile meccanismo di rottura.

STATI LIMITE DI SERVIZIO

Elementi strutturali

Le verifiche in esercizio sono sostanzialmente quelle di deformabilità.
Nel calcolo della deformabilità bisogna considerare le deformazioni lente dovute alla viscosità sia nei materiali che dei giunti. In generale la deformazione istantanea u_{inst} si calcola utilizzando il modulo di elasticità medio per il materiale ed il modulo di scorrimento istantaneo per le unioni meccaniche.

La deformazione finale si ottiene dalla seguente formula:
$u_{fin} = u_{inst} + u_{creep} = u_{inst} x (1 + \psi_2 x k_{def})$
dove:

- ψ_2 è definito nell'EC1;
- k_{def} è il coefficiente che tiene conto dell'aumento di deformazione nel tempo.

Per ogni combinazione di carico bisogna calcolare il contributo della deformazione relativa a ciascun carico separatamente e poi sommare i contributi. Ad esempio nel caso di un solaio per civile abitazione dove i carichi sono solo i permanenti G_k e gli accidentali Q_k si ha:

- effetto dei soli carichi permanenti $u_{fin,G} = u_{inst,G} x (1 + 1 x k_{def})$;
- effetto dei soli carichi accidentali $u_{fin,Q} = u_{inst,Q} x (1 + 0,3 x k_{def})$;
- deformazione istantanea totale $u_{inst} = u_{inst,G} + u_{inst,Q}$;
- deformazione finale totale $u_{fin} = u_{fin,G} + u_{fin,Q}$;

essendo:

$\psi_2 = 1$ per i carichi permanenti;

$\psi_2 = 0,3$ per i carichi accidentali negli edifici residenziali.

Le norme forniscono dei limiti di riferimento sia per la deformazione istantanea che finale. Ad esempio per travi semplicemente appoggiate vengono indicati i seguenti valori:

- u_{inst} = da 1/500 a 1/300 della luce;
- u_{fin} = da 1/300 a 1/150 della luce.

Materiale	**Riferimento**		**classe di servizio**		
			1	**2**	**3**
Legno massiccio	EN 14081-1		0,60	0,80	2,00
Legno lamellare incollato	EN 14080		0,60	0,80	2,00
Compensato	EN 636	Parte 1	0,80	-	-
		Parte 2	0,80	1,00	-
		Parte 3	0,80	1,00	2,50
Pannello di scagli orientate (OSB)	EN 300	OSB/2	2,25	-	-
		OSB/3 – OSB/4	1,50	2,25	-
Pannello di particelle (truciolare)	EN 312	Parte 4	2,25	-	-
		Parte 5	2,25	3,00	-
		Parte 6	1,50	-	-
		Parte 7	1,50	2,25	-
Pannello di fibre, alta densità	EN 622-2	HB.LA	2,25	3,00	-
		HB.HLA1, HB.HLA 2	2,25	-	-
Pannello di fibre, media densità (MDF)	EN 622-3	MBH.LA1 MBH.LA2	3,00	-	-
		MBH.HLS1 MBH.HLS2	3,00	4,00	-
	EN 622-3	MDF.LA	2,25	-	-
		MDF.HLS	2,25	3,00	-
Per legno massiccio posto in opera con umidità prossima al punto di saturazione, e che possa essere soggetto a essiccazione sotto carico, il valore di k_{def} dovrà, in assenza di idonei provvedimenti, essere aumentato a seguito di opportune valutazioni, sommando ai termini della tabella un valore comunque non inferiore a 2,0.					

Tabella 4.15: Valori di k_{def} secondo le Norme Tecniche.

Unioni

Per il calcolo dello scorrimento nelle unioni utile, ad esempio, per la valutazione della freccia di strutture con unioni meccaniche, si usa un modulo di scorrimento come definito in figura. Per la deformazione viscosa si userà un coefficiente k_{def} maggiorato (circa di due volte) rispetto a quello del legno.

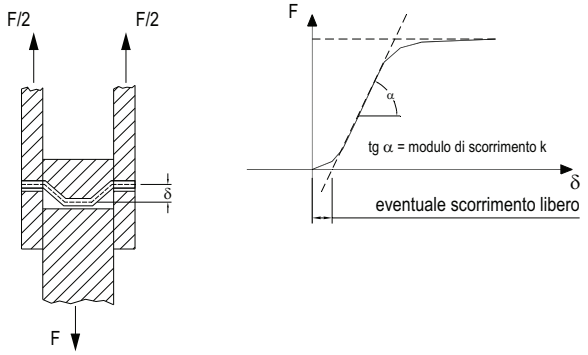


Figura 4.18: Modulo di scorrimento per una unione meccanica.

Tipo del mezzo di unione	K_{ser}
Spinotti Bulloni Viti Chiodi (con preforatura)	$\rho_m^{1,5} d/23$
Chiodi (senza preforatura)	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/30$
Cambrette	$\rho_m^{1,5} d^{0,8}/35$
Connettori ad anello tipo A secondo EN 912 Connettori a caviglia tipo B secondo EN 912	$\rho_m d_c/2$
Connettori a piastra dentata del tipo da C1 a C9 secondo EN 912	$1,5\rho_m d_c/4$
Connettori a piastra dentata del tipo C10 e C11 secondo EN 912	$\rho_m d_c/2$

Tabella 4.16: Modulo di scorrimento per collegamenti meccanici secondo l'Eurocodice 5. ρ_m è la massa volumica media del legno, d è il diametro dell'elemento di collegamento meccanico, d_c è il diametro dell'elemento del connettore.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] D.M. II.TT. - 14/01/08 "Norme tecniche per le costruzioni".
[2] CNR DT 206/2007 "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno".
[3] UNI EN 1990: Eurocodice. "Criteri generali di progettazione strutturale".
[4] UNI EN 1991-1: Eurocodice 1 – "Azioni sulle strutture".
[5] UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici".
[6] UNI EN 1995-1-2: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio."
[7] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici".
[8] UNI EN 338 - "Legno strutturale - Classi di resistenza".
[9] UNI EN 1912 – "Legno strutturale - Classi di resistenza - Assegnazione delle categorie visuali e delle specie".
[10] UNI EN 1194 – "Legno lamellare incollato - Classi di resistenza e determinazione dei valori caratteristici".
[11] UNI 11035 – "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale".
[12] DIN 4074 – „Sortierung von Holz nach Tragfähigkeit".

4.6 UNIONI E TIPOLOGIE DI COLLEGAMENTO

Le unioni nelle strutture di legno rivestono un ruolo fondamentale; la loro corretta progettazione e realizzazione determina il corretto funzionamento e la durata di vita di una struttura. Hanno infatti un'influenza determinante su diversi aspetti: comportamento strutturale, resistenza sismica, resistenza al fuoco, durabilità. Per questo motivo lo sviluppo tecnologico in questo settore è stato frequentemente decisivo nella crescita e diffusione di alcuni sistemi costruttivi per l'edilizia in legno. Anzi spesso le possibili modalità di collegamento diventano fondamentali nella scelta del sistema costruttivo da adottare, anche in funzione dell'ottimizzazione delle fasi di trasporto e montaggio della struttura.
Possono essere suddivise in funzione delle loro modalità di realizzazione e del loro funzionamento in tre gruppi:

- unioni meccaniche;
- unioni incollate;
- unioni di carpenteria.

Naturalmente tutte e tre le tipologie sono caratterizzate da livelli differenti di resistenza, duttilità, velocità e facilità di realizzazione, ma dal punto di vista strutturale sono tutte valide per la risoluzione di problemi differenti di collegamento fra componenti strutturali lignei che si possono presentare sia nella costruzione di nuove strutture che nel consolidamento di quelle esistenti. Nonostante si siano originati in periodi e momenti storici diversi, tutti e tre i settori stanno conoscendo attualmente un notevole sviluppo: la diffusione delle moderne macchine a controllo numerico ha determinato una riscoperta delle unioni di carpenteria, l'esperienza maturata oramai da diversi decenni ha portato alla realizzazione di adesivi strutturali sempre più efficaci, affidabili e sempre meno tossici, l'invenzione continua di nuovi mezzi di collegamento e nuove soluzioni applicative, sempre più pratiche, efficaci e veloci, in seguito sopratutto alla crescita e diffusione dei sistemi per l'edilizia residenziale in legno, sta portando il settore della ferramenta a ricoprire un ruolo di avanguardia nel campo delle costruzioni in legno.

UNIONI MECCANICHE

Le unioni meccaniche sono di gran lunga il sistema più utilizzato per il collegamento dei vari componenti strutturali soprattutto nella realizzazione di edifici a struttura di legno. In funzione della tipologia possono essere a loro volta divise in due sottoinsiemi:

- unioni con elementi di collegamento a gambo cilindrico;
- unioni con connettori di superficie.

Nel primo gruppo ricadono le unioni con chiodi, spinotti, bulloni e viti, nel secondo le unioni con connettori ad anello, a caviglia, piastre chiodate e piastre dentate.

Generalità sul comportamento strutturale delle unioni meccaniche

A differenza delle unioni in strutture realizzate con altri materiali, come cemento armato e acciaio, e delle unioni incollate che vedremo in seguito, le unioni meccaniche sono unioni semi-rigide, ossia a livello di nodo strutturale hanno un comportamento intermedio fra la cerniera e l'incastro (si veda §4.5).
Questo comporta, come vedremo nel Capitolo 5, per alcune tipologie strutturali in cui la connessione fra i vari elementi sia realizzata esclusivamente mediante unioni meccaniche (ad es. gli edifici a telaio di legno), la necessità di prevedere degli elementi strutturali di irrigidimento della maglia strutturale in verticale e in orizzontale.
Il calcolo delle unioni con elementi meccanici di collegamento si effettua con la teoria di Johansen, espressa sia all'interno dell'Eurocodice 5 che delle CNR/DT 206, che consente di calcolare la capacità portante dell'unione in funzione di varie modalità di rottura del giunto, caratterizzate da un minore o maggiore comportamento duttile in funzione sia della resistenza a rifollamento del legno (per la definizione di rifollamento si veda §4.2 e §4.7) che del momento di snervamento dell'elemento metallico di collegamento.
Nei collegamenti con mezzi di unione metallici a gambo cilindrico si definiscono i piani di taglio come il numero di sezioni efficaci per ciascun connettore. Le unioni ad un piano di taglio devono essere, di regola, utilizzate in configurazioni simmetriche rispetto all'elemento da collegare.
Nel calcolo della resistenza dell'unione, nelle formule relative alle varie modalità di rottura, compaiono i seguenti termini:

- la resistenza caratteristica a rifollamento $f_{h,k}$ del legno (funzione della massa volumica caratteristica ρ_k e del diametro dell'elemento di collegamento d);
- il momento di snervamento dell'acciaio $M_{y,k}$ (funzione della resistenza ultima dell'acciaio $f_{u,k}$ e del diametro dell'elemento di collegamento d);
- il diametro dell'elemento di collegamento d;
- gli spessori dei legni da collegare (e della piastra metallica nelle unioni legno-acciaio);
- il diametro della testa dell'elemento;

- la profondità di penetrazione nel secondo legno.

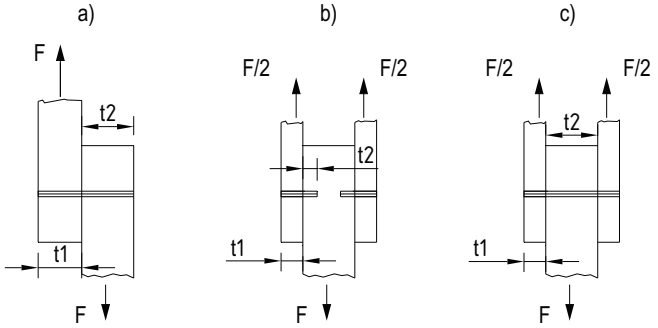


Figura 4.19: Unione ad un piano di taglio (a,b) e a due piani di taglio (c).

Si riportano a titolo d'esempio le formule per il calcolo della resistenza a taglio del giunto per collegamento a semplice sezione resistente per il caso di unioni legno-legno riferite alle modalità di rottura a-f di Figura 4.20.

$$F_{f,Rk} = \min\begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,2,k} t_2 d \\ \dfrac{f_{h,2,k} t_1 d}{1+\beta}\left[\sqrt{\beta + 2\beta^2\left[1+\dfrac{t_2}{t_1}+\left(\dfrac{t_2}{t_1}\right)^2\right]+\beta^3\left(\dfrac{t_2}{t_1}\right)^2}-\beta\left(1+\dfrac{t_2}{t_1}\right)\right] \\ 1{,}05\times\dfrac{f_{h,1,k} t_1 d}{2+\beta}\left[\sqrt{2\beta(1+\beta)+\dfrac{4\beta(2+\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_1^{\,2}}}-\beta\right]+\dfrac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1{,}05\times\dfrac{f_{h,1,k} t_2 d}{1+2\beta}\left[\sqrt{2\beta^2(1+\beta)+\dfrac{4\beta(1+2\beta)M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} d t_2^{\,2}}}-\beta\right]+\dfrac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 1{,}15\sqrt{\dfrac{2\beta}{1+\beta}}\sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,1,k} d}+\dfrac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases}$$

con $\beta = \dfrac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$

Le formule forniscono il valore caratteristico della resistenza a taglio del giunto per singola sezione resistente e per singolo elemento di collegamento. Il valore di progetto della resistenza si ricaverà applicando il valore del coefficiente di modificazione della resistenza k_{mod} e del coefficiente di sicurezza parziale γ_M per le unioni (si veda a questo proposito §4.5).

$$F_{f,Rd} = \frac{F_{f,Rk} \times k_{mod}}{\gamma_M}$$

Per ottenere il valore di progetto di resistenza del giunto il valore sopra ricavato andrà pertanto moltiplicato per il numero di sezioni di taglio e per il numero totale di elementi di collegamento.

Il calcolo di resistenza dell'unione prescinde in ogni caso da comportamenti di tipo fragile che si possono instaurare se l'unione non è correttamente progettata e che possono portare al suo collasso, prima che si possa instaurare uno qualsiasi dei meccanismi di rottura. Per questo motivo prima di effettuare il calcolo dell'unione è necessario verificare le distanze minime fra elementi di collegamento e dai bordi degli elementi lignei da collegare, sia in direzione parallela che in direzione perpendicolare alla fibratura, secondo le indicazioni fornite per le varie tipologie di unione dall'Eurocodice 5.

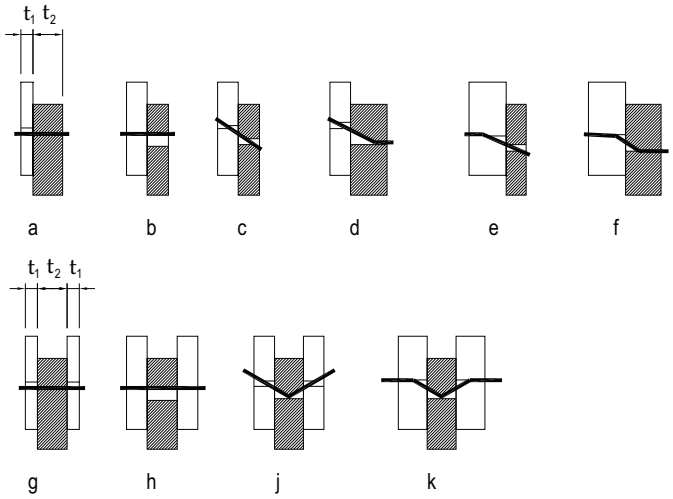


Figura 4.20: Modi di rottura per unioni legno-legno e pannello-legno a singola (a-f) e doppia (g-k) sezione resistente secondo la teoria di Johansen per il calcolo della capacità portante a taglio di mezzi di unione a gambo cilindrico proposte dall'Eurocodice 5 e dalle CNR DT/206.

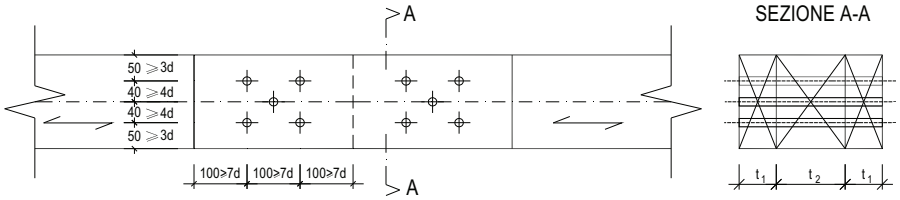


Figura 4.21: Interassi minimi fra elementi di collegamento e distanze minime dai bordi dell'elemento in direzione parallela e perpendicolare alla fibratura per una unione centrale in una catena di una capriata con due "guance" di legno laterali. L'unione è a doppia sezione resistente e tutte le distanze sono espresse in funzione del diametro d dell'elemento di collegamento.

Il mancato rispetto delle distanze minime può portare all'insorgere di fessurazioni da splitting come nei casi a e b di Figura 4.22.
Quando si utilizza una disposizione strettamente raggruppata degli elementi di collegamento o più elementi di collegamento in fila, la capacità portante dell'unione può essere determinata dalla resistenza allo strappo di uno dei due elementi lignei da collegare. Occorre pertanto verificare che le tensioni di taglio del legno non vengano superate lungo il contorno dell'area di collegamento (caso c Figura 4.22).

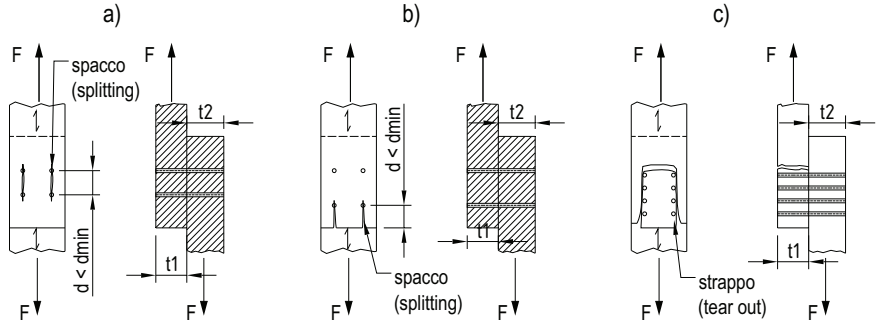


Figura 4.22: Rottura del giunto per splitting per mancato rispetto della distanza minima tra elementi di collegamento parallemente alla fibratura (caso a) e per mancato rispetto della distanza dal bordo sollecitato parallelamente alla fibratura (caso b) e per strappo nel caso di elementi di collegamento raggruppati (caso c).

Anche la realizzazione dell'unione con elementi troppo distanziati fra loro in direzione perpendicolare alla fibratura è da evitare, soprattutto nel caso di unioni esposte, per evitare l'insorgere di fessurazioni determinate dalla

impedita possibilità per il legno di sfogare gli inevitabili movimenti dovuti al ritiro e al rigonfiamento. Si veda a proposito quanto detto all'inizio del §4.5.
L'Eurocodice 5 e le CNR/DT 206 introducono anche delle formule per limitare la resistenza del giunto nel caso di più elementi disposti lungo lo stesso allineamento parallelo alla fibratura. A questo proposito un utile accorgimento può essere quello di sfalsare gli elementi di collegamento di mezzo diametro lungo lo stesso allineamento, come nel giunto di Figura 4.23.

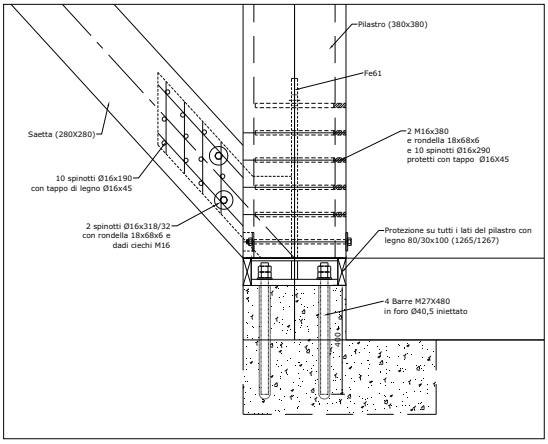


Figura 4.23: Particolare di un collegamento fra pilastro e saetta di controvento. Si noti lo sfalsamento degli elementi di collegamento lungo lo stesso allineamento nella saetta e la previsione di tappi di legno di protezione al fuoco.

Particolare attenzione va posta inoltre alla protezione del giunto nei confronti del fuoco. A questo proposito l'Eurocodice 5, parte 1-2 (UNI EN 1995-1-2), dà utili indicazioni sulla protezione ad esempio degli elementi cilindrici di collegamento con tappi di legno e sulle modalità di protezione delle piastre metalliche di collegamento inserite all'interno degli elementi da collegare.

Unioni con elementi di collegamento a gambo cilindrico

Gli elementi cilindrici di collegamento vengono utilizzati molto frequentemente nelle unioni meccaniche delle strutture di legno, in quanto consentono di risolvere diverse problematiche nella connessione degli elementi strutturali, sono generalmente di facile posa, e inoltre conferiscono alla struttura nel suo insieme degli ottimi livelli di duttilità e di capacità dissipativa in dipendenza del loro diametro e del loro numero complessivo.

I chiodi sono generalmente realizzati con filo d'acciaio con tensione di rottura $f_u \geq 600$ N/mm^2 e hanno diametri variabili dai 2 agli 8 mm e lunghezze fino ai 330 mm. In legni di densità inferiore ai 500 kg/m^3 possono essere infissi a martello o con chiodatrici automatiche (in sedi preforate per diametri > 8 mm), mentre nelle latifoglie dure è sempre necessario il preforo. Si dividono in chiodi lisci e chiodi ad aderenza migliorata che possono essere a loro volta a stelo elicoidale o a rilievi tronco-conici.

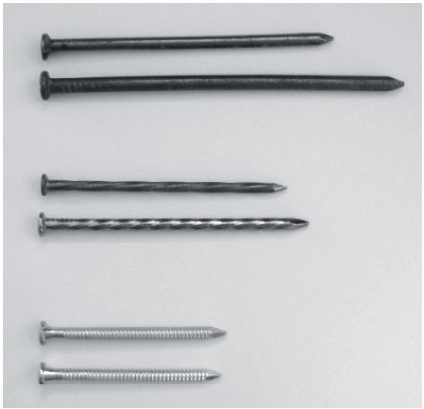


Figura 4.24: A partire dall'alto: chiodi lisci, chiodi elicoidali e chiodi a rilievi tronco-conici.

Sono molto utilizzati in quasi tutti i sistemi costruttivi per l'edilizia in legno, in particolar modo come elementi di collegamento in sistemi "leggeri" come nel sistema Platform Frame, nel quale svolgono il ruolo fondamentale di connessione dei pannelli di legno strutturale (compensato o OSB) all'intelaiatura delle pareti e degli orizzontamenti. La resistenza delle pareti alle azioni orizzontali in questo sistema è unicamente determinata dalla resistenza a taglio dei chiodi di collegamento, che in un intero edificio possono superare talvolta le diverse migliaia.

	d≤8mm	d>8mm
Chiodi		
$\rho_k \leq 500$ kg/m^3	senza preforatura	con perforatura ≤ 0,8d
$\rho_k > 500$ kg/m^3	con perforatura ≤ 0,8d	con perforatura ≤ 0,8d

Tabella 4.17: preforatura per i chiodi.

Figura 4.25: Edificio Platform sottoposto a prova sismica presso la tavola vibrante del NIED a Tsukuba nel 1998. Il collasso della parete al piano terra è avvenuto per crisi per taglio dei chiodi di collegamento del pannello di rivestimento all'intelaiatura.

Le **viti** sono forse il tipo di connettore, fra i collegamenti meccanici per le strutture di legno, che sta avendo negli ultimi anni la maggiore evoluzione. Le viti tradizionali si dividono in viti a testa esagonale e viti a testa svasata; le prime hanno il diametro del filetto pari a quello del gambo liscio, le seconde hanno diametro del filetto maggiore di quello del gambo liscio. I diametri variano da 3 ai 20 mm. Devono necessariamente essere inserite in sede preforata, effettuando un primo preforo con diametro pari al diametro del gambo liscio e un secondo con diametro pari al 70% del diametro del filetto. La profondità di penetrazione delle viti dovrà essere uguale ad almeno 4*d*. Vanno sempre inserite con una rondella che per le viti a testa svasata ha una apposita forma tronco-conica.
Tutte le viti vanno comunque sempre inserite mediante avvitatori e non battute o conficcate a forza, altrimenti si pregiudica seriamente la resistenza del collegamento.

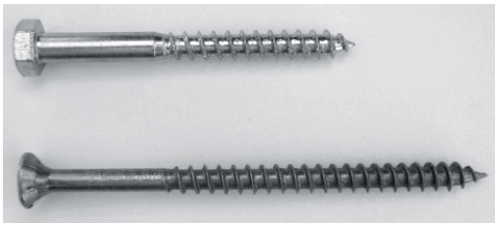


Figura 4.26: A partire dall'alto: vite a testa esagonale, vite a testa svasata.

Ultimamente vengono molto utilizzate due tipologie nuove di viti, che hanno consentito di semplificare e velocizzare notevolmente alcune forme di collegamento, e hanno di fatto determinato lo sviluppo di nuovi sistemi costruttivi per l'edilizia. Le **viti auto-foranti** sono delle particolari viti a testa svasata (possono avere comunque anche testa esagonale) dotate di un particolare intaglio longitudinale in punta che consente di inserire la vite nel legno senza la necessità di effettuare il preforo e senza la possibilità di formazioni di spaccature nel legno (che si verificherebbero sicuramente nel caso di inserimento di una vite normale senza preforo) e di una parte elicoidale all'inizio della parte filettata che facilita l'inserimento della parte liscia del gambo. Hanno diametri variabili dai 3 ai 12 mm e lunghezze fino ai 600 mm.
Vengono molto utilizzate nel sistema a pannelli portanti a strati incrociati, per il collegamento di tutti i pannelli delle pareti e dei solai, consentendo un montaggio veloce e preciso.

Figura 4.27: Utilizzo di viti auto-foranti nel collegamento solaio-pareti in un edificio a pannelli portanti.

Le **viti a doppio filetto** sono viti dotate di doppia filettatura, intervallate da una parte liscia dello stelo; il passo diverso fra i due tratti filettati consente di serrare fra loro gli elementi da collegare introducendo degli stati di compressione fra i pezzi. Consentono di risolvere un grande numero di casi specifici di collegamento di elementi strutturali di legno, dal collegamento fra travi principali e secondarie, al serraggio di elementi da incollare, al rinforzo strutturale di travi con intagli o fori. Hanno diametri variabili dai 6,5 agli 8,2 mm e lunghezze variabili dai 130 ai 300 mm.

	$d_{gambo\ liscio} \leq 6mm$	$d_{gambo\ liscio} > 6mm$
Viti a gambo liscio		
$\rho_k \leq 500\ kg/m^3$	senza preforatura	con preforatura: pari a $d_{gambo\ liscio}$ per la lunghezza del gambo liscio; pari a 0,7 $d_{filetto}$ per la lunghezza del filetto
$\rho_k > 500\ kg/m^3$	con preforatura: pari a $d_{gambo\ liscio}$ per la lunghezza del gambo liscio; pari a 0,7 $d_{filetto}$ per la lunghezza del filetto	con preforatura: pari a $d_{gambo\ liscio}$ per la lunghezza del gambo liscio; pari a 0,7 $d_{filetto}$ per la lunghezza del filetto
Viti autoforanti	senza preforatura	
Viti a tutto filetto	senza preforatura	

Tabella 4.18: Preforatura del legno in funzione della tipologia di vite.

Figura 4.28: A partire dall'alto: vite auto-forante, vite a doppio filetto.

Figura 4.29: dettaglio della punta di una vite auto-forante.

Gli **spinotti** o perni di acciaio sono elementi di acciaio dolce (generalmente Fe360) a gambo liscio con le teste leggermente svasate per facilitarne l'inserimento. Vanno inseriti a martello in fori dello stesso diametro del

diametro dello spinotto. Vale la pena ricordare che i fori vanno eseguiti subito prima dell'inserimento; se si eseguono i fori e si realizza il collegamento dopo molto tempo, magari lasciando il legno all'esterno, il foro si ritroverà ovalizzato a causa dei movimenti di ritiro e rigonfiamento e sarà impossibile effettuare l'inserimento. Una unione meccanica realizzata con spinotti deve prevedere anche l'inserimento di almeno 2 bulloni o barre filettate che impediscano l'apertura del giunto. Hanno diametri variabili dagli 8 ai 30 mm.

Esistono anche degli **spinotti speciali auto-foranti**, ossia spinotti dotati di una lama di acciaio all'estremità, appositamente progettati per unioni con piastre d'acciaio inserite all'interno degli elementi lignei, capaci di forare sia il legno che le piastre (per spessori massimi della piastra d'acciaio di 5 mm e fino ad un massimo di 3 piastre). Hanno diametri variabili dai 5 ai 7 mm e lunghezze dai 70 ai 233 mm.

Spinotti	con preforatura ≤ d
Spinotti autoforanti	senza preforatura

Tabella 4.19: Preforatura del legno in funzione della tipologia di spinotto.

I **bulloni** sono elementi cilindrici lisci dotati di testa esagonale da una parte e estremità filettata dall'altra, oppure possono essere dotati di filettatura ad entrambe le estremità. Sono generalmente di classe 4.6 o 5.6 o come per gli spinotti di acciaio Fe360 quando ottenuti da tondi di acciaio liscio. Vanno inseriti in fori di diametro pari al diametro del bullone maggiorato di 1 mm e occorre sempre prevedere l'utilizzo di rondelle da legno con diametro pari almeno a 3,5 volte il diametro del bullone e spessore pari almeno a 0,3 volte lo stesso diametro. Anche i bulloni hanno diametri variabili dagli 8 ai 30 mm.

Bulloni	con preforatura >d; ≤ (d+1mm)
Bulloni calibrati	con preforatura =d

Tabella 4.20: Preforatura del legno per bulloni.

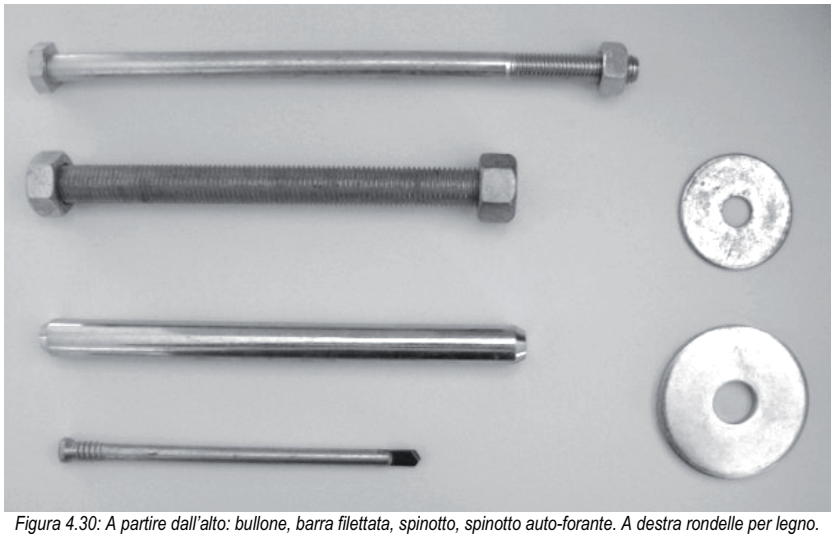


Figura 4.30: A partire dall'alto: bullone, barra filettata, spinotto, spinotto auto-forante. A destra rondelle per legno.

Gli spinotti e i bulloni sono utilizzati in tutti i sistemi costruttivi per l'edilizia, in particolar modo nei sistemi intelaiati per il collegamento fra travi, pilastri ed elementi di controvento.

Unioni con connettori di superficie

L'utilizzo di connettori di superficie permette il trasferimento di grandi sollecitazioni di taglio mediante l'aumento della superficie di contatto nel legno. Per questo motivo vengono molto utilizzati ad es. nel collegamento di elementi di parete di grosse strutture reticolari di copertura, nelle quali l'utilizzo di connettori di superficie è talvolta l'unica soluzione possibile per risolvere il problema della trasmissione di grossi sforzi.

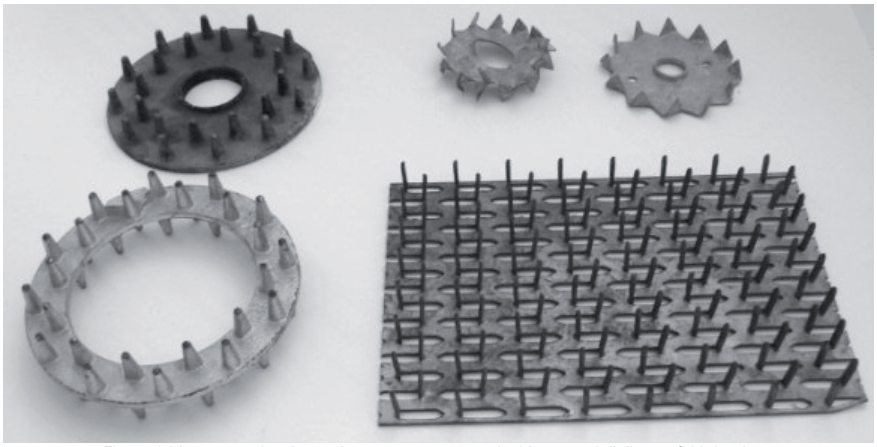


Figura 4.31: connettori a piastra dentata monograppanti e bigrappanti di diversa fabbricazione.

A parte le **piastre chiodate**, molto utilizzate nel collegamento delle strutture di copertura degli edifici Platform Frame, ossia travi reticolari formate da elementi della stessa sezione standard di pareti e solai, i connettori di superficie sono generalmente realizzati con un foro interno per l'inserimento di un bullone di serraggio che ha l'unica funzione di impedire l'apertura del giunto, mentre la resistenza a taglio del giunto è data unicamente dal contatto fra connettore e legno.

Figura 4.32 : Travi reticolari di copertura in un edficio Platform frame collegate con piastre dentate.

I **connettori ad anello e a caviglia** sono elementi cilindrici di acciaio con diametri esterni variabili tra i 60 e i 260 mm. Necessitano di frese apposite per la realizzazione dei fori nel legno (la cui precisione è essenziale per il funzionamento del giunto); una volta realizzate le fresature per l'inserimento dei connettori e il foro per l'inserimento del bullone di serraggio e posizionati i connettori, si posizionano i legni da unire e quindi si inserisce il bullone di serraggio per la chiusura del giunto. Per l'inserimento dei connettori ad anello è necessario effettuare la fresatura in tutti e due i legni da unire, mentre per i connettori a caviglia la fresatura va effettuata su un solo legno per caviglie monograppanti e su entrambi i legni per caviglie bigrappanti (ossia con le scanalatura su entrambe le facce).

I **connettori a piastra dentata**, che possono essere anch'essi monograppanti (denti su una sola faccia) o bigrappanti (denti su entrambe le facce), non necessitano di frese apposite per l'inserimento ma vengono inseriti a forza e serrati anche loro con il bullone di serraggio, pertanto il montaggio è più rapido. La trasmissione degli sforzi avviene pertanto direttamente tra i denti del connettore e il legno. Hanno diametri variabili tra i 38 e i 165 mm.

UNIONI INCOLLATE

Da qualche decennio lo sviluppo di adesivi di origine chimica per incollaggi strutturali dotati di elevate prestazioni meccaniche e durabilità nel tempo ha sostanzialmente cambiato la tecnica delle costruzioni di legno, permettendo l'invenzione di nuovi materiali a base di legno (legno lamellare incollato ma anche pannelli di legno massiccio a strati incrociati per fare un esempio recente) che hanno dato un nuovo impulso in tutto il mondo alla tecnica delle costruzioni in legno. Questo tipo di incollaggi, effettuato in stabilimento a condizioni di temperatura e umidità controllate, consentono di ottenere delle prestazioni meccaniche garantite.
Gli incollaggi vengono oggi utilizzati anche nella realizzazione dei collegamenti tra elementi strutturali e, sebbene in questo settore particolare si continuino a preferire le unioni meccaniche in virtù della loro capacità di conferire a tutta la struttura quelle caratteristiche di duttilità e dissipazione di energia necessarie per la resistenza alle azioni sismiche, rappresentano talvolta l'unica soluzione possibile sopratutto in quei casi in cui è necessario realizzare un'unione rigida.
Gli incollaggi strutturali sono utilizzati frequentemente anche nel campo del consolidamento delle strutture di legno antiche, ad esempio per la ricostruzione in opera di testate di travi o capriate degradate.

Soprattutto in questo campo vengono utilizzate le resine epossidiche, che, grazie ad alcune loro peculiari caratteristiche, costituiscono i collanti più ampiamente utilizzati sopratutto per la realizzazione di incollaggi in opera. Le resine epossidiche vengono usate pure o caricate con inerte minerale fine (filler) per incollare parti di legno o acciaio, oppure vengono caricate con inerti di granulometria da fine a grossa per la realizzazione di conglomerati adatti a riempimenti e ricostruzioni.
I prodotti a base di resina epossidica sono in generale molto sensibili al dosaggio, alle condizioni di conservazione, alla temperatura esterna, all'eccessiva umidità del legno, al tempo che intercorre fra la miscelazione e la messa in opera, alla temperatura durante la maturazione ed a vari altri fattori difficilmente controllabili in condizioni di cantiere; per questo si consiglia sempre di far utilizzare questi prodotti a personale esperto sotto la diretta supervisione di un Tecnico.
É bene utilizzare resine caricate in maniera tale da raggiungere la consistenza tixotropica (malte epossidiche) spatolabili in maniera tale che non colino; le resine liquide tendono infatti a colare svuotando le zone di incollaggio, inoltre penetrano nelle fessure del legno e ne possono bloccare i naturali movimenti, circostanza che genera pericolose autotensioni nel legno.

Le tipologie di collegamento incollato maggiormente utilizzate sono sostanzialmente di due tipi:

- unioni legno-legno;
- unioni con barre incollate parallelamente alla fibratura.

Entrambe le tipologie possono essere utilizzate sia nella realizzazione di unioni per strutture nuove che negli interventi di consolidamento sulle strutture antiche.

Le unioni legno-legno, oltre che per la connessione di elementi strutturali possono essere utilizzate per piccole ricostruzioni di parti degradate. Queste possono essere eseguite mediante l'incollaggio di tavolette di legno con malta epossidica (tecnica del lamellare in opera); tale tecnica può essere applicata su grossi volumi facendo attenzione a non contrastare i naturali movimenti del legno.

La realizzazione del collegamento mediante la tecnica delle barre incollate parallelamente alla fibratura garantisce la compatibilità dei materiali in quanto è la direzione secondo la quale il legno ha ritiri e rigonfiamenti trascurabili; una eventuale barra inserita trasversalmente rispetto alla fibratura contrasterebbe il ritiro e rigonfiamento del legno generando pericolose autotensioni di taglio alternate sull'incollaggio. Per questo motivo è opportuno che le barre siano incollate parallelamente alla fibratura.
Per la giunzione eseguita mediante l'incollaggio di barre si utilizzano normalmente barre di acciaio o vetroresina o altro materiale composito; le barre di acciaio ad aderenza migliorata da c.a. e le barre filettate hanno una sufficiente adesione con le malte epossidiche e non hanno alcuna controindicazione per quest'uso, pertanto non c'è motivo di utilizzare barre di materiale composito sicuramente più costose e non sempre più resistenti.

Un'interessante applicazione del collegamento con barre d'acciaio incollate per la realizzazione di unioni in una struttura nuova è quello illustrato in Figura 4.33 e Figura 4.34. Nella copertura a due falde del caso A, essendo impossibile realizzare l'appoggio sul lato destro del fabbricato, per realizzare un giunto rigido fra le due travi a semplice rastremazione nella sezione d'apice, si è dovuto ricorrere alla tecnica delle barre incollate parallelamente alla fibratura. Da notare che essendo il lembo teso all'estradosso, le travi vanno realizzate con le lamelle parallele all'estradosso, in modo che nel bordo compresso le lamelle risultino sollecitate a compressione inclinata rispetto alla fibratura.

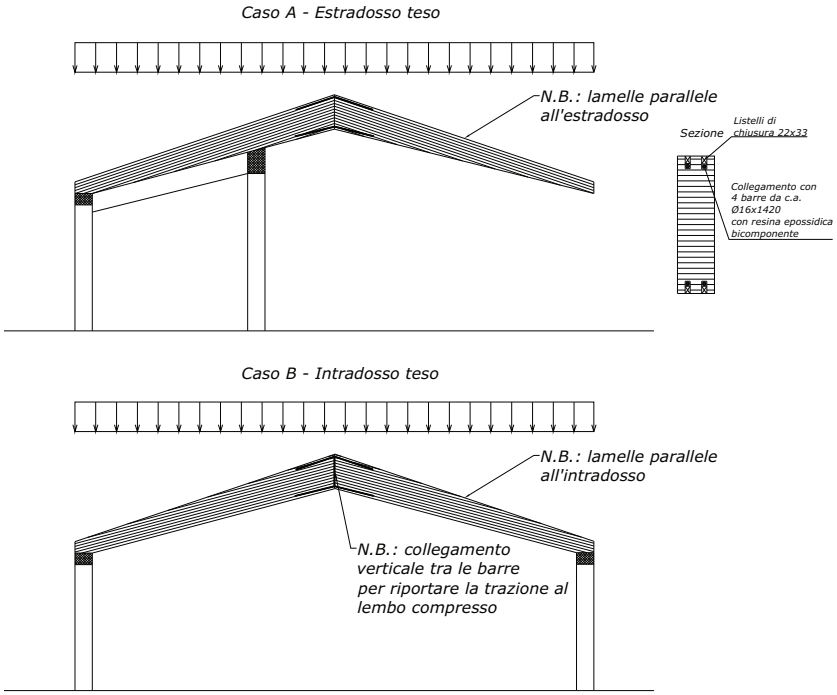

Caso A - Estradosso teso
N.B.: lamelle parallele all'estradosso
Sezione
Listelli di chiusura 22x33
Collegamento con 4 barre da c.a. Ø16x1420 con resina epossidica bicomponente
Caso B - Intradosso teso
N.B.: lamelle parallele all'intradosso
N.B.: collegamento verticale tra le barre per riportare la trazione al lembo compresso

Figura 4.33: Collegamento di travi a semplice rastremazione con barre incollate parallelamente alla fibratura. Nel caso B occorre prevedere una barra verticale di collegamento per riportare le tensioni di trazione al bordo compresso.

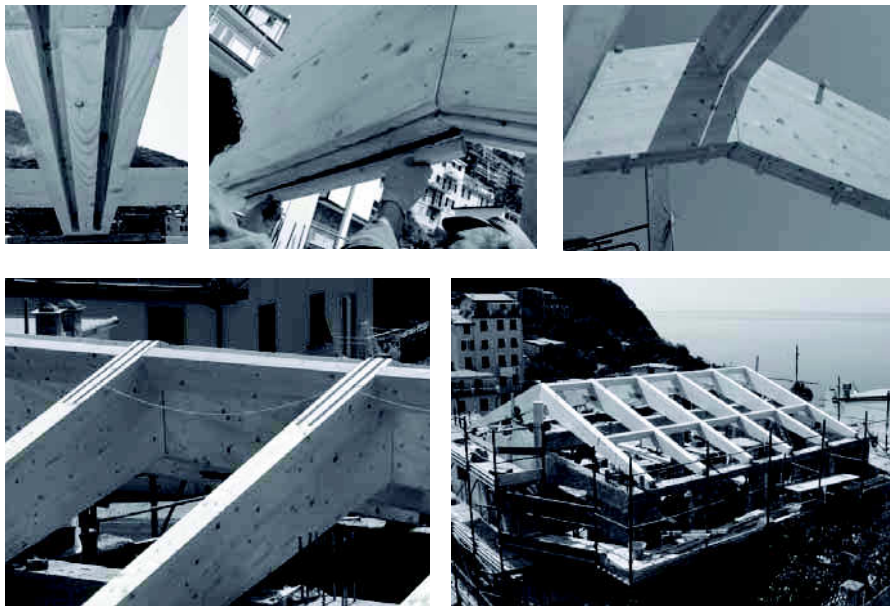


Figura 4.34: Fasi realizzative del collegamento di Figura 4.33 (Foto Valerio Rao). Realizzazione dei canali ed inserimento della resina epossidica; inserimento delle barre e chiusura dei canali con listelli di legno tenuti forzati con traversini di legno avvitati fino a maturazione dell'incollaggio.

Se invece fosse stato possibile prevedere un appoggio sul lato destro, come nel caso B, la situazione statica sarebbe cambiata completamente. Il lembo teso sarebbe diventato quello all'intradosso per cui sarebbe stato

necessario prevedere una barra verticale[3] di collegamento tra le barre all'intradosso e all'estradosso per riportare le tensioni di trazione al bordo compresso. In questo caso inoltre, essendo il lembo teso all'intradosso, le lamelle vanno disposte parallele all'intradosso. I ragionamenti fatti sull'opportunità di disporre le lamelle parallele al lembo teso si riferiscono alle azioni che provocano le maggiori tensioni, quindi i carichi verticali dall'alto verso il basso; nel caso di vento che tende a sollevare è possibile che le tensioni ai lembi si invertano di segno, tuttavia generalmente l'azione del vento di sollevamento provoca tensioni molto basse.

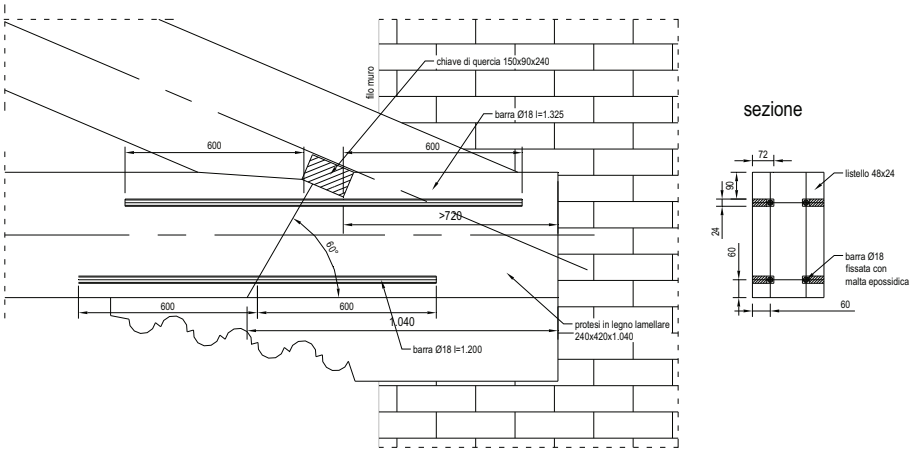


Figura 4.35: Realizzazione della protesi in legno lamellare per la catena della capriata, collegata alla catena esistente con barre d'acciaio incollate parallelamente alla fibratura.

La tecnica del collegamento incollato con barre d'acciaio inserite parallelamente alla fibratura è utilizzata spesso anche negli interventi di consolidamento, ad esempio nel caso di ricostruzioni di testate di capriate che hanno subito un degrado biologico. Generalmente l'elemento degradato è la catena della capriata; anche il puntone può risultare degradato nella zona inserita nella muratura, in tal caso non è necessario ricostruire anche la testa di questo in quanto può essere ridisegnato il giunto fra catena e puntone per saltare la zona degradata.

Fra il dente del puntone e quello della catena l'inserimento di una chiave di legno duro (quercia); questa facilita le operazioni di montaggio della protesi e migliora l'accoppiamento, potendo essere conformata ed inserita come ultima operazione subito prima dell'incollaggio delle barre. La chiave può anche estendersi lungo l'intradosso del puntone per contrastare in zona di legno sano.

Da notare che le malte epossidiche utilizzate per l'incollaggio non possono essere applicate con temperature troppo basse (normalmente 10°C), pertanto nei periodi invernali spesso tale tecnica non è utilizzabile.

Per la realizzazione di un intervento di questo tipo, si esegue il taglio della zona degradata con elettrosega a catena dopo aver disegnato la linea di taglio su ambedue le facce della catena lignea, si utilizzano come guida due tavole inchiodate lungo le linee di taglio, si realizza un taglio inclinato generalmente di 60° rispetto al piano orizzontale, eventualmente la superficie di taglio può essere regolarizzata o con la lama stessa della elettrosega o con una pialla elettrica.

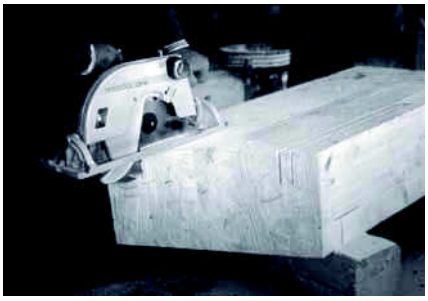
Quindi si realizza la protesi sulla base del taglio eseguito. L'ancoraggio della protesi viene realizzato mediante barre di acciaio inserite in appositi canali scavati lateralmente alla protesi ed alla catena.

In alternativa le barre possono essere inserite in appositi fori praticati di testa mediante punte da legno di opportuna lunghezza e diametro e la resina può essere iniettata attraverso fori di controllo eseguiti lateralmente, tale tecnica è molto più complessa e non garantisce migliori risultati.

Le barre dovranno essere alloggiate dopo aver riempito i canali con malta epossidica, avendo cura di spingerle in profondità affinché risultino completamente avvolte dalla malta epossidica.

A malta ancora fresca i canali dovranno essere tappati con listelli forzati all'interno mediante morsetti che andranno mantenuti per almeno 24 ore; la corretta esecuzione potrà essere verificata controllando in questa fase l'espulsione della malta in eccesso.

[3] In generale è opportuno che le barre incollate siano in direzione parallela alla fibratura, direzione secondo la quale le variazioni dimensionali del legno indotte dai cambiamenti di umidità sono trascurabili. Barre incollate in direzione ortogonale alla fibratura contrastano i movimenti del legno che in tale direzione sono massimi e quindi si possono verificare fessure parallele alla fibratura.
In questo caso però è necessario riequilibrare la componente verticale degli sforzi nelle barre di unione e quindi si rende necessaria la barra verticale; da notare che una eventuale fessura parallela alla fibratura che dovesse insorgere a seguito della perdita di umidità del legno non si ritiene particolarmente dannosa in quanto nella sezione di mezzeria gli sforzi di taglio sono bassi e quindi anche una sezione fessurata non desta preoccupazione.



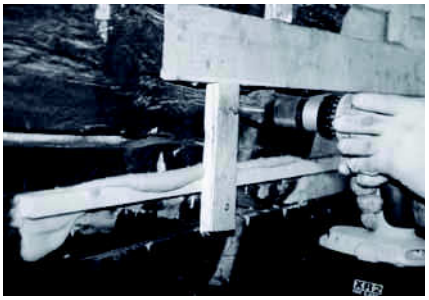
1 - Lavorazione della protesi con una sega circolare per tracciare i canali per l'alloggiamento delle barre.

2 –Realizzazione dei canali di alloggiamento delle barre e asportazione del legno inciso con lo scalpello.

3 – Trattamento della protesi con prodotto insetticida e fungicida, avendo cura di non applicare il prodotto nei canali per non pregiudicare il successivo incollaggio.

4 - Inserimento della barra di acciaio.

5 – Inserimento dei listelli all'interno del canale



6 – Fissaggio di traversini di legno avvitati, forzando il listello nel canale si ha la fuoriuscita della malta epossidica in eccesso.

7 – Dopo 24 ore di maturazione della colla si può eseguire la piallatura per asportare la malta epossidica in eccesso e regolarizzare le superfici.

8 - Intervento eseguito, messa in opera della fascia metallica passiva. Prima della ricostruzione della muratura la testata viene trattata con prodotto preservante insetticida e fungicida, rivestita con foglio di sughero da 3cm e protetta con una cuffia di rame.

Figura 4.36 : Fasi realizzative dell'intervento di Figura 4.35.

UNIONI DI CARPENTERIA

Le unioni di carpenteria sono utilizzate per la trasmissione degli sforzi solamente attraverso il contatto diretto legno-legno, talvolta mediante l'interposizione di elementi di legno duro.
Nelle strutture antiche, dalle pagode dell'architettura tradizionale dell'estremo oriente, alle stav-kirke norvegesi (chiese interamente a struttura di legno, costruite intorno al 1000-1200 d.C. e tuttora esistenti), alle capriate di copertura dei nostri edifici monumentali e delle nostre chiese, le unioni tra i vari elementi lignei venivano quasi esclusivamente realizzate mediante giunti di carpenteria generalmente lavorando ad ascia le superfici.
Ma esistono anche le connessioni di carpenteria moderne, che, grazie allo sviluppo impresso alla tecnica costruttiva edilizia in legno dalle macchine a controllo numerico che consentono di realizzare connessioni anche complesse con estrema precisione, vengono utilizzate sempre più frequentemente, essendo anche molto apprezzate dai progettisti architettonici "intransigenti" in tema di eco-sostenibilità.

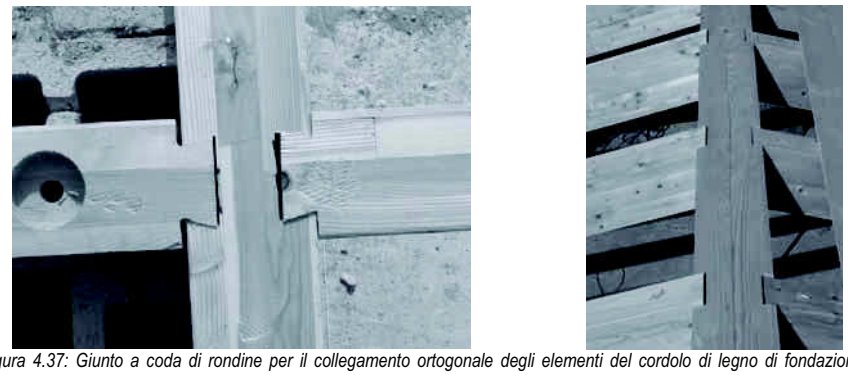


Figura 4.37: Giunto a coda di rondine per il collegamento ortogonale degli elementi del cordolo di legno di fondazione (a sinistra) e per il collegamento delle travi secondarie alla trave di colmo (a destra).

In ogni caso la loro realizzazione, talvolta anche accompagnata dall'utilizzo di elementi metallici di collegamento necessari per evitare l'apertura del giunto, costituisce spesso la soluzione ideale per risolvere dettagli costruttivi altrimenti difficilmente realizzabili anche nei sistemi per l'edilizia in legno.

Le unioni tradizionali di carpenteria possono essere classificate in funzione delle modalità di trasmissione delle sollecitazioni di taglio, compressione, trazione o flessione.
Esempi tipici di connessione di carpenteria, utilizzati per trasmettere sollecitazioni assiali, sono i giunti fra gli elementi delle capriate tradizionali palladiane molto diffuse nelle coperture di chiese ed edifici monumentali in Toscana e nel resto d'Italia.
Per comprenderne il funzionamento è necessario analizzare il comportamento statico di una semplice capriata alla Palladio.

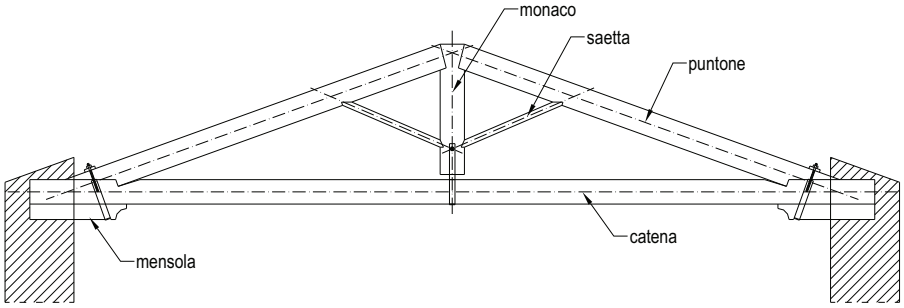


Figura 4.38: Capriata classica Palladiana.

I puntoni sono realizzati in un sol pezzo, contrastano in basso contro la catena ed in sommità contro il monaco; sono soggetti a pressoflessione.
Le saette offrono un appoggio intermedio ai puntoni limitandone il momento flettente; sono soggette a compressione.
Il monaco ha la funzione di elemento di interposizione fra le sommità dei puntoni ed in tale zona risulta compresso ortogonalmente alla fibratura, inoltre riprende gli sforzi trasmessi dalle saette e li riporta alla sommità dei puntoni risultando teso.

La catena può essere realizzata in un sol pezzo, o in due o più pezzi uniti fra loro in vario modo, generalmente con giunto a "Dardo di Giove" (si veda Figura 4.39), e accoglie e richiude le spinte provenienti dai puntoni, pertanto risulta prevalentemente tesa, il momento flettente ed il taglio derivanti dal peso proprio ai fini pratici generalmente risultano trascurabili.

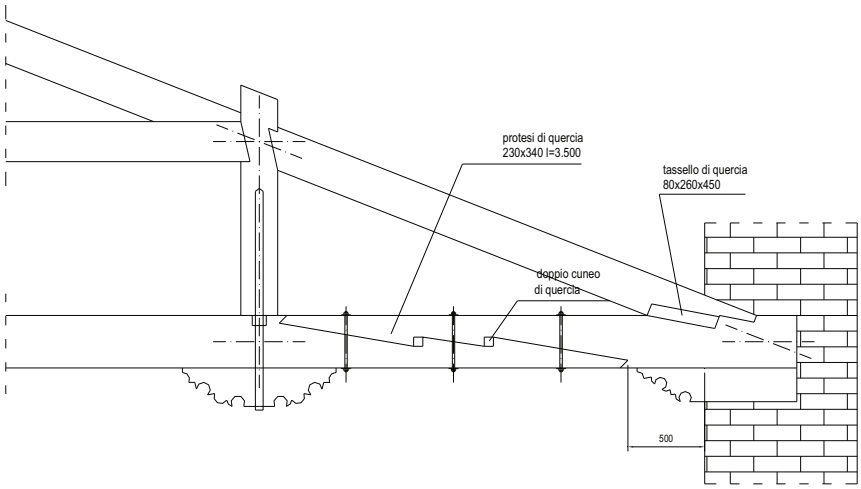


Figura 4.39: Giunto a doppio dardo di Giove per la trasmissione di sollecitazioni di trazione in una catena di una capriata.

Fra il monaco e la catena è presente una fascia metallica che offre un appoggio intermedio alla catena limitandone l'inflessione.

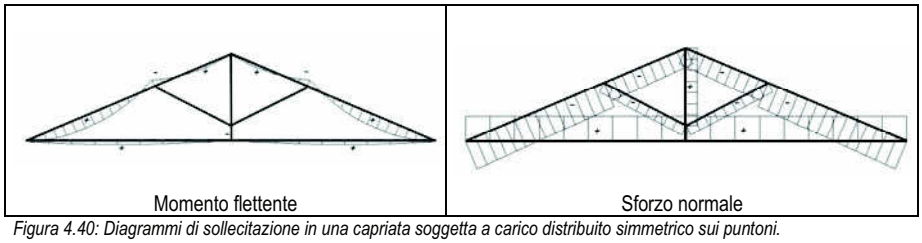


Figura 4.40: Diagrammi di sollecitazione in una capriata soggetta a carico distribuito simmetrico sui puntoni.

Il giunto più importante è senz'altro quello fra puntone e catena perché soggetto ai maggiori sforzi ed è determinante per il funzionamento della capriata come struttura chiusa non spingente, inoltre è normalmente situato all'interno della muratura dove c'è il maggior pericolo di degrado biologico.
La rottura del giunto può avvenire anche perché spesso non si ha spazio per realizzare il dente abbastanza lungo da poter soddisfare con largo margine la verifica a taglio.
Inoltre la cattiva realizzazione del giunto può innescare sia in esercizio che sotto l'azione sismica lo "scalzamento" del dente per trazione ortogonale alla fibratura; tale pericolo può essere scongiurato riducendo la zona di contatto sub-orizzontale fra puntone e catena limitando l'effetto leva.

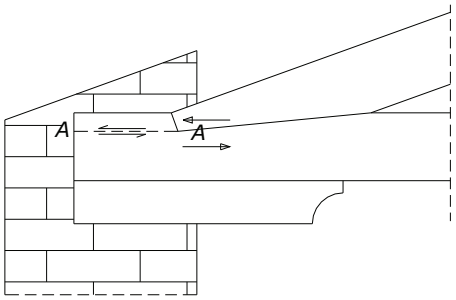


Figura 4.41: La componente orizzontale dello sforzo di compressione del puntone si trasferisce alla catena per mezzo del dente situato sopra la superficie A-A, su tale superficie si sviluppano tensioni di taglio.

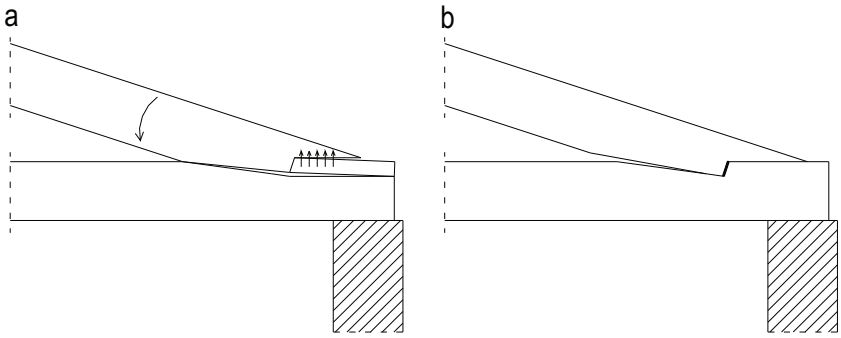


Figura 4.42: Riducendo la zona di contatto sub-orizzontale fra puntone e catena e limitando l'effetto leva (caso b) si riduce il pericolo di scalzamento del dente per trazione ortogonale alla fibratura sotto l'effetto dell'azione sismica (caso a).

L'eventuale cedimento del dente di contrasto provoca lo scorrimento del puntone verso l'esterno, il puntone può trovare contrasto direttamente nella muratura trasformando la capriata da struttura chiusa non spingente a struttura spingente, oppure può entrare in funzione la fasciatura passiva se presente; in entrambi i casi, anche se non si raggiunge il crollo, si ha lo scorrimento del puntone con conseguente diminuzione dell'angolo fra puntoni e catena e l'allentamento delle saette.
L'allentamento delle saette è un campanello di allarme del dissesto in atto, esso provoca l'aumento dei momenti flettenti nei puntoni di circa 3 volte e può portare al crollo della capriata per rottura dei puntoni.

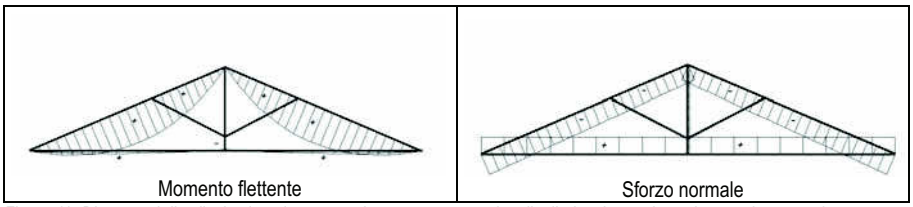


Figura 43: Diagrammi di sollecitazione in una capriata soggetta a carico distribuito simmetrico sui puntoni a saette lente.

Spesso il dissesto delle capriate è accompagnato dalla diminuzione degli angoli fra puntoni e catena a seguito dello scorrimento dei puntoni rispetto alla catena, evidenziata dall'abbassamento del colmo e dall'allentamento delle saette; è sempre opportuno ripristinare la geometria originaria prima di eseguire gli interventi di consolidamento.

Secondo le CNR DT/206 i collegamenti tradizionali di carpenteria realizzati attraverso la lavorazione delle superfici di contatto, devono essere considerate generalmente in grado di trasmettere solamente sforzi di compressione per contatto, e quindi in grado di esplicare solamente la funzione di vincolo monolatero, a meno che non siano opportunamente accoppiate ad altre tipologie di unioni.
Per questo motivo, nei collegamenti tradizionali come ad es. i collegamenti compressi delle capriate occorre prevedere dei presidi, come ad esempio l'inserimento di viti o chiodi, in modo che tali elementi rimangano in posizione anche nel caso di inversione della sollecitazione dovuta all'azione sismica.

Figura 4.44: Nelle coperture tradizionali con capriate spesso i collegamenti compressi fra i diversi elementi costituenti l'orditura della capriata sono a gravità (ad es. collegamento delle saette ai monaci e ai puntoni): vanno previsti dei presidi in modo che tali elementi rimangano in posizione anche nel caso di inversione della sollecitazione dovuta all'azione sismica.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] D.M. II.TT. - 14/01/08 "Norme tecniche per le costruzioni".
[2] CNR DT 206/2007 "Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture di legno".
[3] UNI EN 1995-1-1: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Regole comuni e regole per gli edifici."
[4] UNI EN 1995-1-2: Eurocodice 5 – "Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio".
[5] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici."
[6] Follesa M., Lauriola M.P. (2004), *Interventi sulle capriate lignee – Consolidamento*, "Il Manuale del Legno Strutturale, Vol. IV Interventi sulle strutture, Mancosu Editore, Roma.
[7] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2006), *Le strutture di legno in zona sismica - Criteri e regole per la progettazione ed il restauro* II ediz., CLUT, Torino.
[8] Piazza, Tomasi, Modena (2005), *Strutture in legno: Materiale, calcolo e progetto secondo le nuove normative europee*, Hoepli Editore, Milano
[9] K. W. Johansen K.W. (1949), *Theory of Timber Connections*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Ninth volume, Zurich.

4.7 COMPORTAMENTO SISMICO DELLE STRUTTURE DI LEGNO

Il terremoto avvenuto in Molise nel 2002 e la tragica circostanza del crollo della scuola a S.Giuliano di Puglia hanno messo in drammatica evidenza la precaria situazione in cui versa l'edilizia scolastica del nostro paese, soprattutto nelle regioni del centro-sud, in particolar modo per quel che riguarda la sicurezza nei confronti degli eventi sismici. A seguito dell'evento sismico l'Associazione Nazionale dei Comuni Italiani (ANCI) ha effettuato una stima di circa 3 miliardi di Euro necessari per gli investimenti più urgenti che consentissero la messa in sicurezza del patrimonio edilizio scolastico in tutto il paese.
Dall'altra parte del mondo, in California, un paese noto, fra le altre cose, per essere una delle zone a più alto livello di sismicità in tutto il mondo, sempre nel 2002, il Dipartimento dei Servizi Governativi ha realizzato un'indagine sull'idoneità degli edifici scolastici nei confronti delle azioni sismiche. A seguito dell'inchiesta furono richieste delle ulteriori indagini sugli edifici scolastici realizzati in acciaio, calcestruzzo armato o muratura o sistemi misti realizzati tra il 1933 ed il 1979. Edifici scolastici anche più antichi realizzati con struttura di legno sono stati esclusi dall'indagine sulla base del fatto che "*E' noto che gli edifici a struttura di legno mostrano un buon comportamento nei confronti degli eventi sismici*".

CENNI DI SISMICA E DINAMICA STRUTTURALE.

I terremoti sono fenomeni naturali inevitabili, causati dall'attività geologica del nostro pianeta. Si verificano, al contrario di quanto si potrebbe pensare, molto frequentemente, anche se la maggior parte di essi sono appena percettibili. Tuttavia ogni anno in media si verificano in tutto il mondo circa un centinaio di terremoti distruttivi, la maggior parte dei quali fortunatamente con epicentro in mare o in zone poco abitate, concentrati per la maggior parte in alcune regioni del mondo (Est e Sud-Est dell'Asia, America Centrale e del Sud e Oceania soprattutto).
Non essendo possibile prevederli, ossia prevedere con esattezza il luogo, l'istante e l'intensità con la quale un dato evento sismico possa verificarsi, la comprensione del loro meccanismo di formazione ha importanza per capire, in quanto sorgenti di azioni di natura dinamica, quali sono gli effetti che producono sui sistemi strutturali e di conseguenza quali possono essere le scelte e soluzioni costruttive da adottare nella progettazione di un edificio per ridurne il più possibile gli effetti dannosi.
Escludendo i terremoti di origine vulcanica, l'origine della maggior parte degli eventi sismici è spiegabile con la ben nota teoria della tettonica a placche. Secondo questa teoria, il globo terrestre è formato, come una cipolla, da una serie di strati sovrapposti dei quali il più esterno, denominato litosfera, si presenta come un guscio rigido e frazionato in enormi porzioni dette appunto placche o zolle, che "galleggiano" sul magma astenosferico sottostante e sono soggette a lentissimi movimenti di deriva.
Lungo le linee di congiunzione fra le placche, dette linee di faglia, gli strati rocciosi a contatto sono di conseguenza soggetti a crescenti stati tensionali e deformativi che determinano l'accumulo di enormi quantitativi di energia elastica. Quando le tensioni prodotte superano la resistenza meccanica degli strati rocciosi, si ha la formazione di una frattura con un improvviso scorrimento e il conseguente rilascio di un enorme quantitativo di energia accumulata che genera il fenomeno delle onde sismiche sulla superficie terrestre.
Il punto, o per meglio dire la zona, all'interno della crosta terrestre in cui si origina la frattura si chiama ipocentro e il suo corrispondente sulla superficie terrestre epicentro.
Naturalmente il fenomeno è nella realtà più complesso di questa semplice spiegazione, in quanto più che di frattura singola sarebbe più corretto parlare di processo di frattura che si può estendere per tratti di decine o talvolta centinaia di km lungo la linea di faglia. In ogni caso avviene in pochi secondi, talvolta qualche decina, che comunque sono un tempo minimo in confronto ai tempi di accumulo dell'energia necessaria a generare l'evento, dell'ordine della decina o centinaia di anni.

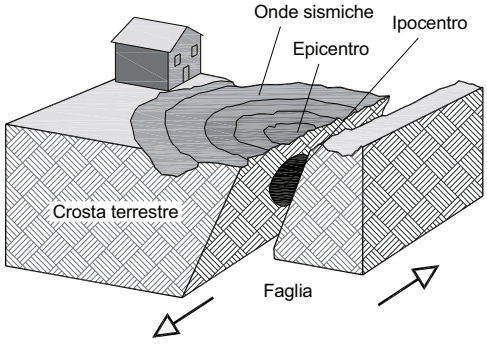


Figura 4.45: Schematizzazione convenzionale del meccanismo di formazione di un terremoto.

In ogni caso gli effetti che un dato evento sismico produce su una costruzione dipendono da numerose variabili, tra le quali si possono considerare:

- la dimensione, l'orientamento e l'entità dello scorrimento nel piano di rottura;
- la profondità dell'ipocentro;
- le caratteristiche meccaniche delle rocce che propagano il moto sismico;
- le caratteristiche meccaniche e la profondità dello strato del terreno in prossimità del sito in cui è realizzato l'edificio;
- la distanza dall'epicentro del sito in cui è realizzato l'edificio.

L'intensità di un terremoto è misurabile mediante le scale sismiche. Le prime scale proposte, prima dell'avvento delle misurazioni strumentali, misuravano l'intensità degli eventi sismici in base ai danni che questi producevano sull'ambiente circostante. La più nota di queste scale, dette scale macrosismiche, è la scala Mercalli, divisa in 12 gradi in funzione della crescente distruzione causata dall'evento sismico. Si propone qui di seguito un estratto degli ultimi gradi, ossia quelli maggiormente distruttivi, di una delle varianti della scala Mercalli, nota come Mercalli-Cancani-Sieberg, del 1930.

X Grado	COMPLETAMENTE DISTRUTTIVO*:* gravissima distruzione di circa ¾ degli edifici, la maggior parte crolla. ***Perfino costruzioni solide di legno*** e ponti ***subiscono gravi lesioni*****,** alcuni vengono distrutti. Argini e dighe sono danneggiati notevolmente, binari leggermente piegati, tubature di impianti troncate, rotte o schiacciate. Crepe e fenditure profonde nei terreni poco densi e umidi, frane nei pendii e negli argini dei fiumi.
XI Grado	CATASTROFICO*:* crollo di tutti gli edifici in muratura, ***soltanto costruzioni e capanne di legno ad incastro di grande elasticità ancora reggono****.* Anche i più grandi e i più sicuri ponti crollano a causa della caduta di pilastri in pietra o del cedimento di quelli in ferro. Binari si piegano fortemente e si spezzano. Tubature vengono spaccate e rese irreparabili. Nel terreno si manifestano vari mutamenti di notevole estensione, dipendentemente dalla natura del suolo: grandi crepe e spaccature si aprono.
XII Grado	GRANDEMENTE CATASTROFICO*:* non regge alcuna opera d'uomo. Lo scombussolamento del paesaggio assume aspetti grandiosi. Flussi d'acqua sotterranei in superficie subiscono i mutamenti più vari: si formano cascate, laghi scompaiono, fiumi deviano.

Tabella 4.21: Descrizione degli ultimi gradi della scala Mercalli-Cancani-Sieberg del 1930.

Pertanto, nei primi decenni del secolo scorso, epoca in cui le costruzioni di legno avevano un larga diffusione in tutta Europa e anche nel nostro paese (si pensi agli edifici con intelaiatura portante di legno e riempimento in muratura, le cosiddette "case baraccate", diffuse soprattutto in Calabria), uno dei metodi per valutare l'elevata intensità di un terremoto era dato dalla osservazione della sua capacità di produrre danni persino sulle strutture di legno.

Più comunemente oggi vengono utilizzate le scale strumentali, come la scala Richter che consente, mediante l'introduzione del concetto di magnitudo, di effettuare una misurazione oggettiva della quantità di energia rilasciata da un terremoto. Un terremoto di magnitudo 4 può essere percepito distintamente in prossimità dell'epicentro, terremoti di magnitudo 5 e 6 sono terremoti di moderata intensità che possono anche causare danni di notevole entità, terremoti di magnitudo 7 e 8 sono terremoti di elevata intensità che possono causare danni estesi alle strutture e generare frane e scorrimenti permanenti anche di notevole entità sulla superficie terrestre.

In generale il moto sismico è caratterizzato da una serie di movimenti oscillatori che avvengono sia orizzontalmente che verticalmente. Nonostante il fatto che le oscillazioni verticali possano essere notevoli e possano talvolta contribuire al crollo di un edificio, quello che interessa maggiormente sono i movimenti orizzontali nei confronti dei quali gli edifici sono più vulnerabili. In riferimento a questi riveste quindi una notevole importanza il massimo movimento orizzontale del terreno al quale è direttamente legato il valore massimo dell'accelerazione prodotta dal moto sismico, detta accelerazione di picco al suolo del terremoto. Pertanto, anche se per caratterizzare un terremoto si parla di intensità nella scala Richter, il migliore indicatore per capire il danno potenziale su di un edificio è il valore dell'accelerazione di picco.

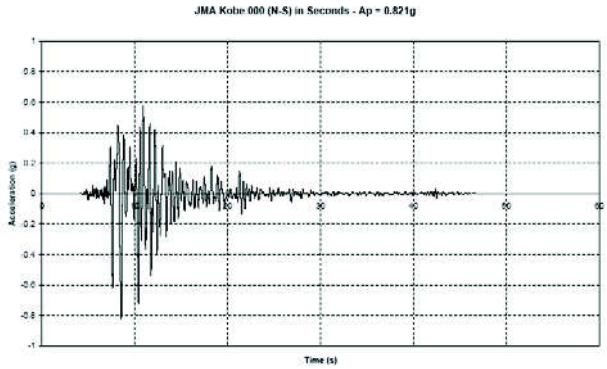


Figura 4.46: Accelerogramma del terremoto di Kobe (17/1/1995) registrato alla Japan Metereological Agency.

Disponendo dell'accelerogramma di un qualsiasi terremoto, è possibile calcolare la risposta (intendendo con questo termine la maggiore o minore vulnerabilità) che, a tali valori dell'accelerazione al suolo, un dato edificio avrebbe in funzione delle masse proprie e portate e delle sue caratteristiche elastiche e dissipative, rappresentate in termini matematici, dal suo periodo proprio T_0 (funzione diretta della massa m e inversa della rigidezza k) e dal rapporto di smorzamento elastico ν. Considerando un oscillatore elementare, rappresentato per semplicità e per rimanere in tema, da un albero, quando questo subisce una accelerazione al suo piede, le masse, ipotizzate totalmente concentrate nella chioma, vengono investite da un valore di accelerazione amplificata o ridotta rispetto a quella registrata al piede, in funzione della rigidezza e dello smorzamento elastico del fusto.

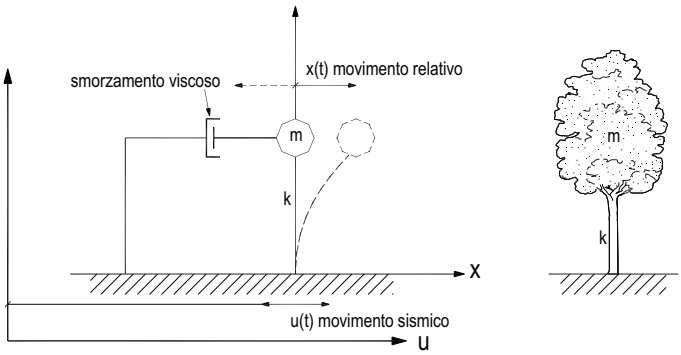


Figura 4.47: Schematizzazione dell'oscillatore elementare sottoposto ad azione sismica.

Calcolando mediante elaborazioni numeriche la risposta in termini di accelerazione massima per ogni coppia di valori T_0 e ν, è quindi possibile tracciare un diagramma dell'accelerazione massima, in funzione di T_0 per ogni valore di ν, detto spettro di risposta elastica dell'accelerogramma considerato. Questo strumento consente di calcolare in maniera immediata le massime sollecitazioni indotte sull'edificio dall'accelerogramma in questione.
Tutto ciò può essere esteso, almeno qualitativamente, anche ai sistemi a più gradi di libertà quali strutture ed edifici complessi: anche per essi l'azione sismica sarà pur sempre funzione della massa, dei modi di vibrazione propri della struttura e in particolare del periodo di vibrazione fondamentale (T_0), nonché della capacità di smorzamento ν.
A livello normativo, basandosi su elaborazioni statistiche di vari terremoti avvenuti in passato, si prevede un unico spettro di risposta elastico "normalizzato", cioè definito a meno dell'intensità e riferito a un valore medio dello smorzamento ν pari al 5%. Questo spettro varia le sue caratteristiche unicamente in funzione del profilo stratigrafico del terreno considerato e può essere utilizzato sia per il calcolo dinamico delle strutture sia per la valutazione delle forze sismiche orizzontali equivalenti.

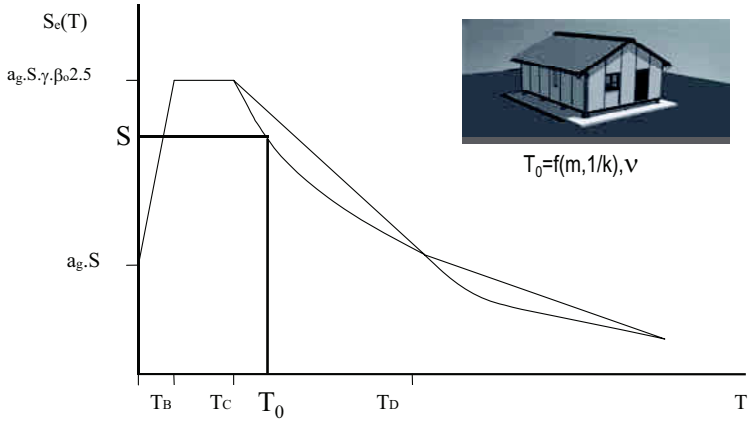


Figura 4.48: Spettro di risposta elastico dato dalla normativa.

Osservando l'andamento del grafico si osserva che il valore dell'ordinata dello spettro è maggiore per strutture dotate di un basso valore del periodo proprio T_0, ossia per le strutture rigide, ed è minore viceversa per le strutture flessibili, ossia caratterizzate da un alto valore del periodo proprio T_0.
Applicando il secondo principio della dinamica, è a questo punto immediato calcolare il valore delle forze sismiche equivalenti che agiscono in campo elastico sulla struttura:

$$F_{se} = S_e\left(T_0, \nu\right) \times a_g \times m$$

dove:

- $S_e(T,\nu)$ è l'ordinata dello spettro di risposta elastico, funzione del periodo proprio della struttura e del suo rapporto di smorzamento elastico
- a_g è il valore massimo dell'accelerazione di picco al suolo, definita in funzione della zona sismica in cui viene costruito l'edificio;
- m è il valore totale delle masse proprie e portate dell'edificio.

Pertanto è immediato comprendere che le azioni sismiche che agiscono su una struttura saranno tanto maggiori quanto:

- maggiori saranno le masse proprie e portate;
- minore è il valore del periodo proprio T_0 della struttura ossia minore è la flessibilità della struttura;
- minore è la capacità di smorzamento elastica posseduta dalla struttura.

PERCHÉ LE STRUTTURE DI LEGNO SONO ADATTE PER REALIZZARE EDIFICI IN ZONA SISMICA?

È opinione ormai comune e diffusa in paesi caratterizzati da una elevata pericolosità sismica come la California (ma anche in tutto il resto degli Stati Uniti e anche in Canada ed in Giappone) che il legno sia un materiale particolarmente appropriato per realizzare strutture in grado di resistere a terremoti anche di elevata intensità.
Il legno come materiale e le strutture in legno in generale sono naturalmente dotate di alcune caratteristiche intrinseche che ne rendono non solo adatto, ma addirittura consigliabile l'impiego in zona sismica.
Le strutture di legno sono infatti **leggere** e pertanto le sollecitazioni indotte dall'azione sismica sono notevolmente inferiori. Basti pensare che fino alla seconda guerra mondiale il legno veniva utilizzato per la costruzione degli aerei ("*Non voglio chiudere senza avere sfiorato un altro argomento che, come italiano e come industriale aeronautico mi sta molto a cuore; il quesito metallo-legno. Su questo punto io sono convinto e deciso: legno! legno! legno! almeno per parecchi anni ancora.*" scriveva in un articolo su "l'Ala d'Italia" nel 1936 l'Ing. Angelo Ambrosini, Presidente della "Società Areonautica Italiana" sul tema del momento, ossia il dibattito su quale fosse il materiale più adatto per costruire gli aerei, metallo o legno).
Allo stesso tempo il legno è un materiale molto **resistente**; la sua resistenza in dimensioni strutturali è dello stesso ordine di grandezza di quella del calcestruzzo, ma rispetto a quest'ultimo è presente anche a trazione.
Il legno è un materiale anche estremamente **deformabile**: il valore medio del modulo elastico del legno parallelamente alla fibratura è all'incirca pari a 1/3 di quello del calcestruzzo. Il fatto che il legno sia deformabile comporta bassi valori di rigidezza e quindi un'alta flessibilità che si può tradurre in un aumento del periodo proprio di oscillazione e, quindi, in una minore suscettibilità della struttura nei confronti dell'azione sismica

Oltre alle succitate caratteristiche del materiale legno, ottimali nei confronti delle azioni sismiche, ne esiste un'altra che sembrerebbe sconsigliarne l'utilizzo in zona sismica ossia **la fragilità**. Infatti, come già visto al §4.5 il legno in dimensione d'uso nelle strutture presenta un comportamento lineare-elastico fino a rottura.
Tutto questo però viene superato nelle strutture di legno attraverso l'utilizzo di elementi meccanici di collegamento, i quali avendo uno spiccato comportamento plastico, permettono il raggiungimento di livelli di duttilità maggiori di 1 per tutto l'organismo strutturale. E questo è particolarmente vero nel caso di edifici per l'edilizia residenziale realizzati con intelaiatura in legno e rivestimento in compensato strutturale o OSB (sistema Platform Frame, si veda a proposito il §5.1), dove la presenza di migliaia di chiodi che collegano gli elementi portanti di legno massiccio ai pannelli di compensato svolge un ruolo fondamentale nel raggiungimento del livello di duttilità necessario al buon comportamento dell'edificio sotto l'azione del terremoto, e anche per il sistema a pannelli portanti a strati incrociati (si veda sempre §5.1), dove la presenza di tante viti e chiodi per il collegamento dei pannelli parete e solaio consente di poter classificare questo sistema costruttivo fra quelli ad alta capacità dissipativa.
Ma un elevato livello di duttilità si raggiungeva anche nelle strutture antiche, pur senza l'utilizzo di elementi meccanici di collegamento. Basti pensare alle pagode caratteristiche dell'architettura dell'estremo oriente, nelle quali la realizzazione di un grande numero di giunti di carpenteria, alcuni dei quali particolarmente complessi, per il collegamento dei vari elementi strutturali, consentiva attraverso la moltiplicazione delle superfici di contatto di dissipare una notevole quantità di energia sotto l'effetto delle azioni sismiche per attrito e per sollecitazioni di compressione ortogonale alla fibratura, stato di sollecitazione per il quale il legno dimostra eccellenti livelli di duttilità.

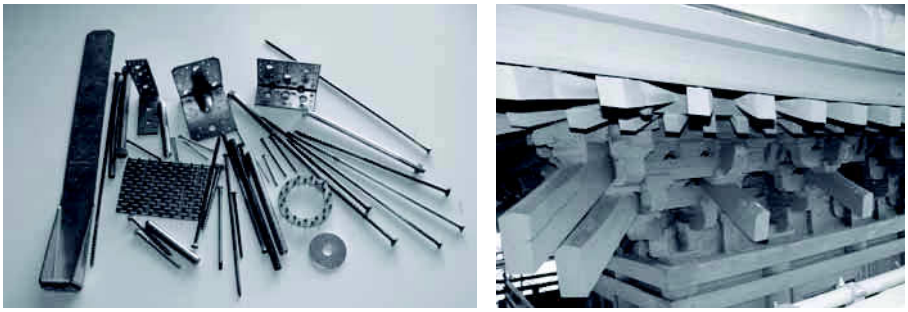


Figura 4.49: A sinistra: elementi meccanici di collegamento tipicamente utilizzati nelle strutture di legno; a destra particolare dell'aggetto della copertura della pagoda del tempio di Hokekjiuji nei pressi di Chiba in Giappone. Nelle pagode giapponesi la realizzazione di giunti di carpenteria così complicati consentiva la moltiplicazione delle superfici di contatto fra i vari elementi strutturali rendendo in tal modo capace l'intera struttura di dissipare l'energia prodotta dal terremoto per attrito e per sollecitazioni di compressione ortogonale alla fibratura.

IL QUADRO NORMATIVO

Per quel che riguarda la progettazione nei confronti delle azioni sismiche, la ormai "vecchia" norma sismica nazionale, anche se ancora in vigore fino al Giugno 2009 (D. M. LL.PP. 16/01/1996 n.11951 "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche") ammette tra i sistemi costruttivi gli edifici a "struttura di legno" (punto C.1. Sistemi costruttivi), ma oltre a questo "riconoscimento" (che supera, almeno in termini "letterari" la vecchia e odiosa dicitura "strutture di legname" della Legge n° 64 del 02/02/1974) le indicazioni e prescrizioni per gli edifici costruiti con questo materiale da costruzione sono quasi totalmente assenti, se si eccettua la limitazione sull'altezza massima in funzione del grado di sismicità (punto C.2. Altezza massima dei nuovi edifici; per edifici a struttura di legno, l'altezza massima consentita è 10 m per edifici costruiti in zone con grado di sismicità S=6, 7 m per edifici costruiti in zone con grado di sismicità S=9 e S=12), e il paragrafo dedicato proprio agli edifici con struttura di legno, costituito da un'unica frase, peraltro vaga e carente (punto C.8. Edifici con struttura in legno; "*Le costole montanti e le altre parti costituenti l'organismo statico degli edifici in legno devono essere di regola di un sol pezzo oppure collegate in modo da non avere indebolimenti in corrispondenza delle giunzioni*."). Manca totalmente qualsiasi riferimento al sistema costruttivo utilizzato, alle tipologie dei giunti e degli orizzontamenti.

Tutto questo ha portato in passato quei pochi progettisti che hanno utilizzato questo materiale da costruzione in zona sismica, a trovare difficoltà se non addirittura in taluni casi vera e propria diffidenza, da parte dei tecnici dei vari Uffici del Genio Civile, che solo in rari casi non si sono "trincerati" dietro l'evidente carenza di indicazioni da parte del sopraccitato D.M. del 96.

Un sensibile miglioramento si è avuto con l'introduzione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3274 del 20 Marzo 2003 e soprattutto del suo aggiornamento n. 3431 del 3 Maggio 2005 che sia nei principi

fondamentali che per le indicazioni progettuali per le varie tipologie di strutture trae larga ispirazione dall'Eurocodice 8.
Nell'Allegato 2 "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici" tuttavia, oltre alla conferma tra i sistemi costruttivi degli edifici a "struttura di legno" (tab. 4.1 punto 9, Sistemi costruttivi), si trova la tabella sulle limitazioni massime delle altezze in funzione della zona sismica (tab. 4.2. Altezza massima dei nuovi edifici) che è sostanzialmente identica a quella riportata nel precedente decreto del 1996, se si eccettua l'introduzione delle limitazioni (nessuna) per gli edifici in zona 4.

Zona sismica	4	3	2	1
Sistema costruttivo	Altezza massima (m)			
Edifici con struttura in legno	nessuna limitazione	10	7	7
...	…	...	...	...

Tabella 4.22: Limitazioni sulle altezze delle costruzioni in funzione della zona sismica secondo l'OPCM 3274/03 e successivi aggiornamenti.

Ossia questa tabella mantiene gli ingiustificati motivi di diffidenza verso l'affidabilità del legno come materiale da costruzione in zona sismica. La tecnica delle costruzioni di legno, la conoscenza del legno strutturale e le ricerche effettuate in questo campo anche e soprattutto nel nostro paese hanno fatto passi da gigante negli ultimi decenni.
E' evidente che le limitazioni sulle altezze erano frutto di una scarsa "confidenza" da parte del normatore nel legno come materiale strutturale capace di resistere alle azioni sismiche. Che questo sia un errore palese è testimoniato dal fatto che in un paese come il Giappone, caratterizzato da eventi sismici di intensità ben superiore rispetto a quelli che si verificano nel nostro paese, non esiste alcuna limitazione d'altezza in zona sismica per gli edifici a struttura di legno. E come potrebbe essere altrimenti in una nazione dove esistono splendidi esempi di architetture interamente a struttura di legno quali le pagode, alcune delle quali raggiungono i 50 m d'altezza e le centinaia d'anni di vita, che sono arrivate intatte fino ai nostri giorni?

Figura 4.50: Pagoda di Horiu-ji a Nara, oltre 30m di altezza, costruita circa 1.400 anni fa. Esempio mirabile di struttura insieme leggera, resistente e flessibile che ha resistito indenne a secoli di terremoti distruttivi.

Subito dopo la tabella sulle limitazioni di altezza viene specificato:
"Per le costruzioni in legno è ammessa la costruzione di uno zoccolo in calcestruzzo o in muratura, di altezza non superiore a 4 m, nel qual caso i limiti indicati si riferiscono alla sola parte di legno. I limiti indicati non si riferiscono a strutture interamente realizzate in legno lamellare (con fondazioni in calcestruzzo e collegamenti in acciaio), per le quali non è prevista alcuna limitazione in altezza."
Secondo l'interpretazione più accettata, le strutture di legno lamellare richiamate sono quelle utilizzate per le coperture di grande luce, realizzate con archi, travi reticolari o strutture geodetiche e scelte principalmente per la copertura di impianti sportivi o di grandi spazi multifunzionali.

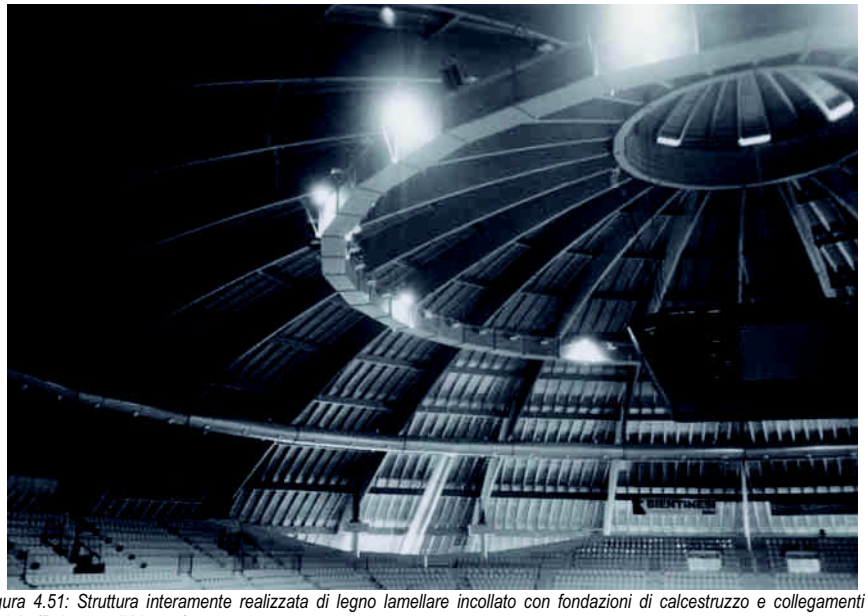


Figura 4.51: Struttura interamente realizzata di legno lamellare incollato con fondazioni di calcestruzzo e collegamenti di acciaio (Palasport di Livorno).

La novità più importante introdotta dall'Ordinanza si trova nel suo aggiornamento 3431/05 ed è il Capitolo 9 "Edifici con struttura di legno" che non è altro che la traduzione del corrispondente Capitolo dell'Eurocodice 8.
Lo stesso capitolo è stato poi integralmente riproposto nel §7.7 del DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" che sono, insieme all'Eurocodice 8, le norme attualmente applicabili per la progettazione delle strutture di legno in zona sismica e che sostituiscono l'ormai decaduta Ordinanza (si veda a proposito §4.2). Si trovano riferimenti sulle regole di duttilità, indicazioni costruttive per i giunti e gli orizzontamenti e i valori dei coefficienti di sicurezza da adottare nel caso di verifica in combinazione di carico sismica. Tuttavia la maggior parte delle indicazioni progettuali e costruttive sono riferite a edifici realizzati con il sistema Platform Frame, attualmente il sistema costruttivo a struttura di legno più conosciuto e più utilizzato al mondo per la realizzazione di edifici residenziali, anche multipiano. Sono carenti, o talvolta del tutto assenti, i riferimenti per la progettazione e realizzazione di edifici costruiti con altri sistemi costruttivi, pur citati e ammessi nella stessa norma (si veda a proposito quanto detto nel §4.3).

Figura 4.52: A sinistra un edificio Log House e a destra un edificio intelaiato. Per questi sistemi costruttivi si trovano poche indicazioni sia sui valori di progetto sia sulle indicazioni costruttive per la progettazione in zona sismica.

Nel §7.2.2. del DM 14/01/2008 "Caratteristiche generali delle costruzioni" è presente una importante novità. Al sottoparagrafo "Altezza massima dei nuovi edifici" viene specificato:
Per le tipologie strutturali: costruzioni di legno e di muratura non armata che non accedono alle riserve anelastiche delle strutture, ricadenti in zona 1, è fissata una altezza massima pari a due piani dal piano di campagna, ovvero dal ciglio della strada. Il solaio di copertura del secondo piano non può essere calpestio di volume abitabile.
Per le altre zone l'altezza massima degli edifici deve essere opportunamente limitata, in funzione delle loro capacità deformative e dissipative e della classificazione sismica del territorio.

Per le altre tipologie strutturali (cemento armato, acciaio, etc) l'altezza massima è determinata unicamente dalle capacità resistenti e deformative della struttura.
Ossia **scompaiono finalmente le limitazioni sulle altezze in funzione della zona sismica per gli edifici di legno** presenti nell'Ordinanza e nel DM del 1996 almeno per le strutture in classe di duttilità alta, anche se permane comunque una distinzione fra edifici a struttura di legno e edifici realizzati in cemento armato e acciaio.

CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE IN ZONA SISMICA SECONDO DM 14/01/2008 E EC8

L'attitudine di una struttura a sviluppare deformazioni plastiche nei suoi elementi strutturali e di dissipare energia senza arrivare alla rottura è una parte essenziale della sua capacità di resistere alle azioni sismiche. Questo è vero per tutti i tipi di strutture ma lo è in particolar modo per le strutture in legno. Come detto in precedenza infatti, un elemento strutturale di legno ha un comportamento lineare elastico sino alla rottura, e sotto l'effetto di un carico ciclico mostra un comportamento spiccatamente fragile, sia per effetto dei difetti naturali di cui è dotato, come i nodi, e sia perché non c'è alcuna dissipazione di energia, ad eccezione di alcune zone con compressione ortogonale alla fibratura.
I giunti incollati hanno anche loro un comportamento elastico, e non contribuiscono né al comportamento plastico della struttura né alla dissipazione di energia. Ciò significa che le strutture in legno composte da giunti incollati ed elementi assemblati con vincoli perfetti, per esempio, debbano essere considerate come strutture non dissipative, senza nessun qualsivoglia comportamento plastico. Comunque un comportamento duttile e la capacità di dissipare energia possono essere raggiunti con le connessioni fra gli elementi strutturali se queste sono "semi-rigide" (come è il caso di molte connessioni meccaniche) invece che "rigide" (come le connessioni incollate). Un progetto adeguato dei giunti con connettori meccanici (chiodi, spinotti, bulloni) consente di ottenere uno spiccato comportamento plastico.
La progettazione antisismica, come suggerito dall'Eurocodice 8 e dalle Norme Tecniche, prevede che le strutture debbano essere concepite secondo il "Criterio della gerarchia delle resistenze", ossia occorre prevedere che gli elementi strutturali a comportamento plastico raggiungano lo stato post-elastico quando gli elementi a comportamento fragile sono ancora in fase elastica e ben lontani dal raggiungimento della rottura. Questo significa che nelle strutture in acciaio ad esempio, i giunti saldati vengano progettati in modo da essere molto più resistenti delle aste (avendo le saldature un comportamento fragile). La funzione dissipativa, essendo insita nelle caratteristiche del materiale, verrà svolta dalle parti di struttura non interessate dalle saldature. Nel C.A. invece, tale comportamento si ottiene progettando le sezioni con una opportuna staffatura, in modo tale da evitare la rottura a taglio che è sempre una rottura fragile. Nel caso delle strutture in legno tale criterio viene perseguito progettando adeguatamente i giunti con connettori meccanici, avendo ovviamente cura nel rendere gli elementi di legno più resistenti dei giunti (esattamente l'opposto quindi del criterio seguito nella progettazione delle strutture in acciaio).

Della duttilità si tiene conto nella progettazione attraverso l'introduzione del fattore di struttura q (o R per le norme canadesi), che consente di ridurre lo spettro di risposta per ottenere lo spettro di progetto da utilizzare nella analisi lineare. Il fattore di struttura è definibile come il rapporto fra l'accelerazione di picco del terremoto che porta al crollo la struttura e l'accelerazione di picco che porta la struttura al raggiungimento del limite elastico:

$$q = \frac{a_u}{a_y}$$

In pratica attraverso l'introduzione del fattore di struttura q, che tiene conto della capacità di dissipazione di energia della struttura attraverso un comportamento duttile, si consente al progettista di progettare la struttura in campo lineare tenendo conto dell'effettivo comportamento non lineare, semplicemente dividendo le ordinate dello spettro di risposta per il valore di questo coefficiente. I valori del fattore di struttura sono ovviamente diversi in funzione del tipo di materiale utilizzato, delle caratteristiche dei giunti e del tipo di struttura. Ovviamente nel caso di strutture poco dissipative tale valore è pari a 1,5 (in realtà a rigore di ragionamento dovrebbe essere 1, ma nella versione attuale dell'Eurocodice 8 tale valore minimo del fattore di struttura è stato portato appunto a 1,5 per tenere conto del contributo dissipativo favorevole dato dalla presenza di strutture secondarie).
L'introduzione del fattore di struttura ci consente pertanto di calcolare agevolmente le forze sismiche di progetto agenti sulla struttura. Riprendendo l'equazione scritta in precedenza per calcolare le forze sismiche agenti in campo elastico si avrà:

$$F_{sd} = \frac{S_e(T_0, \nu) \times a_g \times m}{q}$$

Pertanto tanto maggiore sarà il valore del fattore di struttura, tanto minore sarà il valore delle forze sismiche da considerare nella progettazione, perché si terrà conto della maggiore capacità della struttura di dissipare energia attraverso lo sviluppo di un comportamento duttile.
L'Eurocodice 8 e le Norme Tecniche, nei capitoli relativi alla progettazione delle strutture di legno nei confronti delle azioni sismiche, ci vengono incontro nell'identificazione del corretto valore del fattore di struttura da adottare

in funzione del sistema costruttivo adottato e del tipo di giunti che lo compongono definendo appunto le tipologie strutturali ammesse ed il corrispondente valore del fattore di struttura q. Si veda a questo proposito §4.2 e §4.3.

COMPORTAMENTO DEGLI EDIFICI A STRUTTURA DI LEGNO NEL CORSO DI PASSATI TERREMOTI

Tenuto conto di quanto detto, gli edifici a struttura di legno dimostrano un ottimo comportamento nei confronti delle azioni sismiche. Tutto questo è testimoniato dal buon comportamento durante terremoti avvenuti nel recente passato in aree dove questa tipologia di edifici è largamente diffusa. Nella tabella che segue vengono riportati i risultati di un indagine effettuata sul comportamento di edifici a struttura di legno realizzati con il sistema Platform Frame nel corso di terremoti avvenuti nel recente passato.

Terremoto	Intensità		N° approssimativo di vittime		N° stimato di edifici realizzati con il sistema Platform Frame investiti dal sisma
	Magnitudo Richter (M)	Valore dell'accelerazione di picco al suolo (g)	Totale	In crolli di edifici realizzati con il sistema Platform Frame	
San Fernando CA, 1971	6,7	0,6+	63	4	100.000
Edgecumbe NZ, 1987	6,3	0,32	0	0	7.000
Saguenay QC, 1988	5,7	0,15	0	0	10.000
Loma Prieta CA, 1989	7,1	0,5	66	0	50.000
Northridge CA, 1994	6,7	1,0	60	20	200.000
Hyogo-ken Nambu, Kobe, Giappone, 1995	6,8	0,8	6.300	0*	8.000*

** Riferito ad edifici realizzati con il sistema Platform Frame nell'area investita dal sisma.*

Tabella 4.23: Comportamento di edifici a struttura di legno nel corso di terremoti avvenuti in passato [8].

I risultati evidenziano un valore molto basso di vittime rispetto al numero di edifici interessati dal sisma, soprattutto tenendo in considerazione il fatto che la maggior parte di questi edifici non erano "progettati ingegneristicamente" ossia erano stati realizzati semplicemente seguendo alcune prescrizioni costruttive previste dalle norme (cosa possibile in Nord America ed in Canada per edifici di minori dimensioni e importanza) e non erano stati realizzati sulla base di un progetto strutturale specifico eseguito da un ingegnere.
In particolare nel caso di edifici ad un piano non si sono verificati danni rilevanti per terremoti con valori dell'accelerazione di picco fino a 0,6 g. A seguito del terremoto avvenuto a Kobe (Giappone) nel 1995, uno dei terremoti più forti avvenuti nel recente passato, di circa 8.000 case costruite con il sistema Platform ad uno o due piani, nessuna ha subito crolli e il 70% non ha subito alcun danno rilevante.
Quando collassi ci sono stati, questi sono avvenuti per i seguenti motivi, indipendenti per lo più dalle qualità intrinseche del legno:

- carenze nella realizzazione dell'opera (installazione di un insufficiente numero di elementi di collegamento, mancata installazione degli holdown, etc.)
- cedimento della sottostruttura o delle fondazioni;
- forti asimmetrie nella configurazione strutturale;
- presenza di larghe aperture al piano terra;
- insufficiente resistenza dei camini spesso in mattoni senza alcun rinforzo.

LA RICERCA SUL COMPORTAMENTO SISMICO.

I giunti realizzati con connettori meccanici, come detto, presentano uno spiccato comportamento plastico, a patto che vengano rispettate le prescrizioni riguardanti gli interassi fra i connettori e le distanze dai bordi e dalle estremità degli elementi lignei. Questo è dovuto a due fenomeni che avvengono contemporaneamente: il rifollamento del legno (ossia, come già detto in §4.2, lo schiacciamento localizzato delle fibre legnose per effetto del carico concentrato del connettore sulle pareti del foro di alloggiamento) e la plasticizzazione dei connettori metallici.
La combinazione di questi due comportamenti permette, soprattutto nel caso di applicazione di un carico ciclico (come è il caso dell'azione sismica) con una rapida inversione della forza applicata, la possibilità di raggiungere quel comportamento duttile e dissipativo che è indispensabile per la resistenza alle azioni sismiche. I cicli del

diagramma carico-spostamento assumono una configurazione a "farfalla" il cui corpo centrale si assottiglia man mano che si va verso valori più alti del carico. L'assottigliamento del ciclo è dovuto al fatto che gli elementi meccanici di collegamento si sono fatti posto nel legno e ad ogni incremento del carico continuano a farsene sempre di più, e solo una piccola parte della deformazione nel legno, dovuta all'azione concentrata del connettore, viene recuperata elasticamente, per cui all'inversione del carico si hanno grandi spostamenti per modesti incrementi o decrementi del carico.

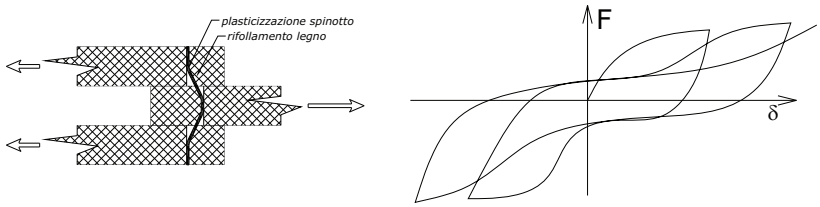


Figura 4.53: Prova ciclica su un giunto.

Questo consente di sviluppare deformazioni rilevanti prima di giungere alla rottura o per frattura localizzata del legno o per crisi dell'elemento di collegamento, e conseguentemente di dissipare una notevole quantità di energia per isteresi.
Le prove cicliche sia sui giunti che su singoli componenti strutturali forniscono in maniera più che soddisfacente tutti i parametri necessari per poter predire il comportamento della struttura sotto un terremoto reale. Infatti se la "forma" del comportamento ciclico del giunto o della parete è nota, è possibile effettuare una analisi non lineare per mezzo di un programma di calcolo agli elementi finiti per riuscire a trovare la resistenza della struttura per un dato terremoto ossia l'accelerazione di picco del terremoto che ne produca il collasso. Naturalmente nel caso di un terremoto reale i cicli saranno meno regolari di quelli osservati durante le prove cicliche in laboratorio perché l'input sarà casuale ed irregolare, ed i cicli effettuati allo spostamento massimo saranno molto pochi mentre quelli più piccoli saranno più numerosi.

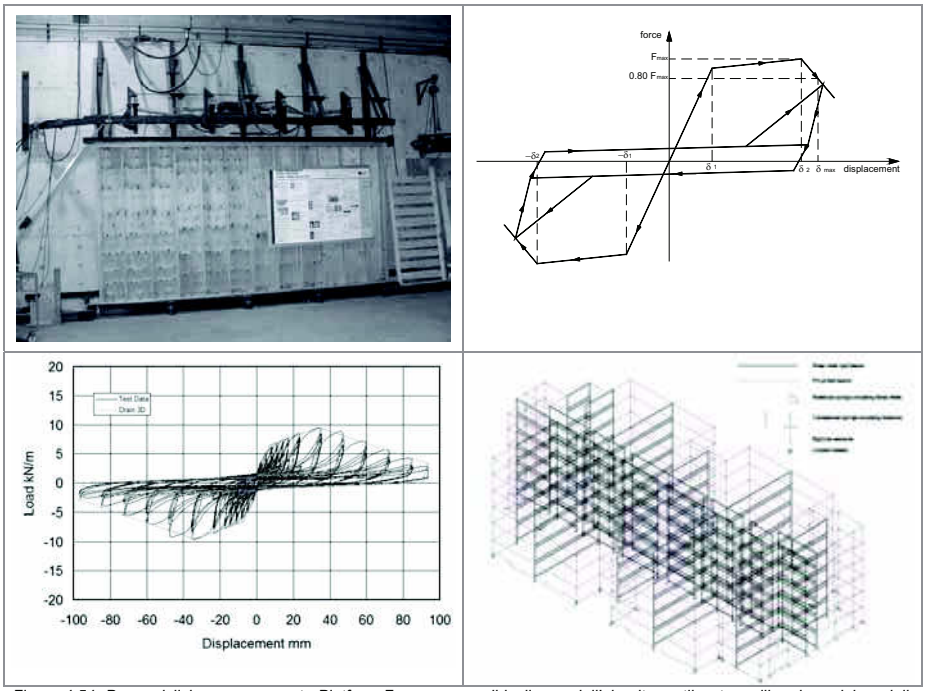


Figura 4.54: Prove cicliche su una parete Platform Frame, curva di inviluppo dell'algoritmo utlizzato, calibrazione del modello mediante il confronto tra simulazioni numeriche e risultati della prova ciclica, costruzione di un modello numerico per un edificio intero.

L'Eurocodice 8, oltre a fornire indicazioni progettuali relative ai sistemi costruttivi più diffusi, indica anche la "strada da percorrere" per i nuovi sistemi costruttivi non contemplati dalla norma. Infatti è possibile utilizzare, come già detto in §4.3, un qualsivoglia sistema costruttivo purché venga dimostrata l'effettiva capacità di sviluppare deformazioni plastiche attraverso un comportamento duttile e di dissipare energia sotto l'effetto di carichi ciclici secondo le procedure indicate in apposite norme di riferimento (EN 12512 "Strutture di legno – Metodi di prova – Prove cicliche su giunti realizzati con connettori meccanici").
La procedura è tutto sommato abbastanza semplice. Si parte da prove di laboratorio nelle quali i singoli elementi costruttivi (ad es. pareti o giunti) vengono sottoposti a storie di carico o spostamento cicliche secondo il protocollo stabilito dalla norma. Quindi si mette a punto un modello numerico, costruito mediante algoritmi capaci di simulare il comportamento non lineare del giunto o dell'elemento provato, che consenta di replicare analiticamente la stessa prova effettuata in laboratorio, e successivamente si "calibra" il modello numerico, confrontando alcuni parametri (massimo carico raggiunto, massimo spostamento raggiunto, quantità di energia dissipata) fino a che il modello numerico e la prova non danno lo stesso risultato (con un minimo margine d'errore). Una volta calibrato il modello numerico sul singolo elemento costruttivo è possibile costruire un modello di un intero edificio e sottoporlo a delle simulazioni con registrazioni di terremoti realmente avvenuti in passato mediante un programma di analisi dinamica non lineare.

Le simulazioni effettuate mediante queste analisi possono essere poi ulteriormente validate mediante il confronto con prove sperimentali effettuate su "tavola vibrante": queste sono delle piattaforme mobili di grandi dimensioni, alimentate da pistoni idraulici, sulle quali è possibile costruire dei modelli su scala reale di singole componenti strutturali di edifici o addirittura di edifici interi, e alle quali è possibile imprimere la storia di spostamento nel tempo di un terremoto reale avvenuto in passato.

Figura 4.55: Prova su tavola vibrante su un edificio a struttura di legno a pannelli portanti di 3 piani effettuata nel 2006 dal CNR-IVALSA in collaborazione con il National Institute for Earth science and Disaster prevention a Tsukuba, Giappone [10].

Le prove sismiche, peraltro estremamente costose, assumono una importanza fondamentale non tanto per dimostrare l'effettiva resistenza di un sistema costruttivo a eventi sismici di forte intensità. Da questo punto di vista ci darebbero un'informazione indicativa ma parziale; infatti se un edificio, con una data configurazione planimetrica e altimetrica, resiste ad un terremoto di una certa intensità, non significa che resisterebbe allo stesso modo ad un terremoto diverso (e quindi con diverso contenuto in frequenza) della stessa intensità, come non è detto che un altro edificio, pur costruito con lo stesso sistema costruttivo ma di configurazione planimetrica e altimetrica diversa, resisterebbe in egual modo allo stesso terremoto provato per l'edificio campione. Le prove sismiche diventano tuttavia fondamentali per la calibrazione di modelli di simulazione numerica che ci possono consentire, in maniera sicuramente più economica, di effettuare numerose simulazioni con edifici di qualsivoglia configurazione planimetrica e altimetrica e con le registrazioni di terremoti diversi.
I risultati delle simulazioni effettuate consentono la valutazione della effettiva capacità di resistenza nei confronti delle azioni sismiche di edifici realizzati con un dato sistema costruttivo, e sopratutto permettono di ricavare valori (primo fra tutti il fattore di struttura q) e indicazioni costruttive che potranno poi servire da supporto per le norme e in ultima analisi per i progettisti che le utilizzeranno nella progettazione.

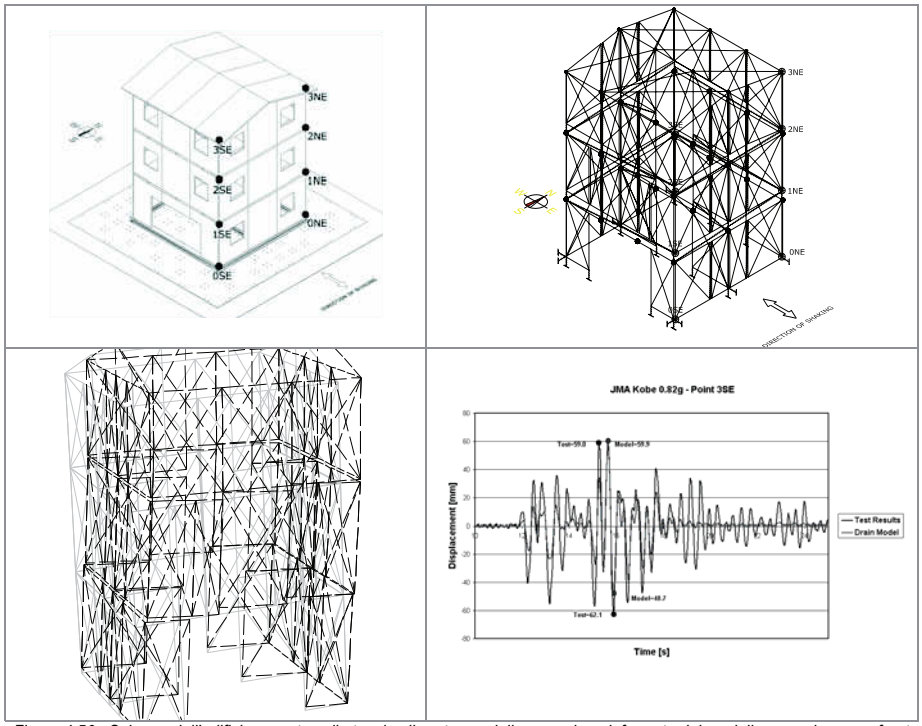


Figura 4.56: Schema dell'edificio provato sulla tavola vibrante, modello numerico, deformata del modello numerico e confronto della simulazione numerica con i risultati della prova [10].

Tutte le prove finora effettuate oltre ad aver consentito di verificare l'effettivo buon comportamento degli edifici a struttura dei legno sotto l'effetto di terremoti reali, hanno dimostrato, sopratutto nel caso di sistemi costruttivi già contemplati dalle normative, la validità delle assunzioni fatte nell'Eurocodice 8 riguardo al valore del coefficiente di struttura da adottare per le varie tipologie costruttive. A questo proposito riportiamo due esperienze particolarmente significative, una portata avanti da un istituto di ricerca italiano e una da un consorzio di cinque università americane.

Il progetto SOFIE

Il Progetto SOFIE (Sistema Costruttivo Fiemme) è un progetto di ricerca finanziato dalla Provincia Autonoma di Trento e coordinato e condotto dal CNR-IVALSA (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Valorizzazione del Legno e delle Specie Arboree), sotto la guida del Prof. A. Ceccotti, attraverso una serie di studi e ricerche sperimentali tra il 2005 e il 2008, volto allo studio e alla promozione di edifici multipiano in legno realizzati con legno trentino.
Lo scopo principale di questo progetto è stato quello di analizzare il comportamento di edifici multipiano costruiti con pannelli di legno a strati incrociati, considerando ogni singolo aspetto relativo alle prestazioni strutturali e al comfort abitativo: dal comportamento statico, al comportamento al fuoco, all'isolamento acustico, termico, agli aspetti legati alla durabilità e in particolar modo al comportamento sismico.
Il progetto, svolto in collaborazione con un nutrito gruppo di università e istituti di ricerca italiani e internazionali, primo fra tutti il giapponese National Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED), si è sviluppato attraverso una serie di esperienze scientifiche e prove sperimentali di grande rilevanza.
In particolare, relativamente alle prove sismiche, i risultati sono stati estremamente interessanti. In una prova effettuata nel 2006 presso la piattaforma sismica sperimentale del NIED di Tsukuba, un edificio di tre piani in vera grandezza (50 m^2 circa di impronta in pianta e 10 m di altezza totale), è stato sottoposto per ben 26 volte alle registrazioni di tre terremoti particolarmente severi (El Centro, California, 1940, Kobe, Giappone, 1995, Nocera Umbra 1997), 15 delle quali con valori dell'accelerazione di picco compresi tra 0,5g e 1,2g (si pensi che il valore dell'accelerazione di picco di progetto secondo la normativa italiana corrispondente alla zona italiana a più alta sismicità è di 0,35g), riportando al termine delle prove danni minimi, solamente a livello di alcuni elementi delle giunzioni meccaniche fra i vari elementi costruttivi (collegamenti verticali fra pannelli parete e collegamento fra

pareti e fondazioni e solai di interpiano), tali comunque da consentirne la riparazione con semplici interventi di sostituzione degli elementi di collegamento danneggiati.
Nel 2007 è stata effettuata una ulteriore campagna di prove su un edificio di 7 piani presso la piattaforma sismica sperimentale più grande al mondo, la E-Defence del NIED a Miki nei pressi di Kobe in Giappone, l'unica capace di poter effettuare prove su edifici in vera grandezza di tali dimensioni (7,5x15 m in pianta e 23 m di altezza) sottoponendoli a tutte le componenti (orizzontali e verticale) di un terremoto, ha dimostrato ancora una volta l'eccezionale capacità degli edifici a struttura di legno di resistere ad eventi sismici di notevole intensità. L'edificio è stato sottoposto alla registrazione di tre terremoti scalati fino alla massima intensità (Kobe, Giappone, 1995, Nocera Umbra 1997 e Kashiwazaki, Giappone 2007) oscillando e ritornando perfettamente in posizione e manifestando al termine delle prove livelli di danno minimi, ancora una volta solamente a livello delle giunzioni meccaniche.
Ciò significa che questa tipologia costruttiva si dimostra molto promettente nel caso in cui la filosofia scelta per la progettazione nei confronti delle azioni sismiche è quella della NDD (No Damage Design) ossia progettare edifici in grado non solo di resistere al crollo, ma anche di dimostrare un livello di danno minimo e facilmente riparabile in caso di terremoti di elevata intensità e bassa probabilità di accadimento.
I risultati pubblicati e il materiale informativo disponibile relativo alle prove sono consultabili sul sito www.progettosofie.it

Il progetto NEESWood (per gentile concessione del Prof. J.W. van de Lindt della Colorado State University)

Il Progetto NEESWood è un progetto nato dalla collaborazione di cinque università americane (Colorado State University, University of Delaware, State University of New York at Buffalo, Rensselaer Polytechnic Institute e Texas A&M University) con due istituti di ricerca internazionali (Fp Innovations- Forintek Canada, NIED Giappone, già citato in precedenza); il tutto è coordinato dal Professor John W. van de Lindt della Colorado State University e finanziato dalla National Science Foundation degli Stati Uniti. Lo scopo del progetto è la definizione di una nuova filosofia di progettazione, denominata *Performance Based Seismic Design* (progettazione prestazionale nei confronti delle azioni sismiche), per la realizzazione di edifici a struttura di legno con il sistema Platform Frame fino a 6 piani in zone ad elevata sismicità, sia negli Stati Uniti che in altre parti del mondo, attraverso una estesa campagna di prove sperimentali e analisi numeriche.
Attualmente infatti l'altezza massima di edifici multipiano realizzati con il sistema Platform Frame in zona sismica in Nord-America è limitata generalmente a quattro piani sia a causa della mancanza di informazioni sulla risposta sismica di edifici più alti, sia per limitare il danno potenziale ad elementi divisori e di rivestimento non strutturali. Questa carenza di conoscenze sul comportamento sismico complessivo degli edifici a struttura di legno di molti piani si riflette anche a livello di indicazioni normative. Le normative per la progettazione degli edifici a struttura di legno attualmente infatti non si basano su un metodo di progettazione che consideri l'edificio nel suo complesso, ma piuttosto sull'analisi dei singoli elementi costruttivi, considerati indipendentemente uno dall'altro, senza valutarne l'influenza in termini di resistenza e rigidezza sul comportamento dell'intero organismo strutturale. Di fatto sono stati questi gli ostacoli, più che considerazioni di altro carattere (ad esempio economico), che hanno limitato la competitività del legno nei confronti dell'acciaio e del cemento armato nella realizzazione di edifici residenziali a molti piani sia negli Stati Uniti che in altri paesi.
Il progetto è partito dall'esecuzione di una serie di prove sismiche su un edificio di due piani a struttura di legno realizzato con il sistema Platform Frame, effettuate presso la piattaforma sismica sperimentale del SESL NEES alla State University of New York at Buffalo nel 2006, allo scopo di testare la resistenza di edifici multipiano progettati secondo la normativa americana e di sviluppare una innovativa strategia di progettazione per la realizzazione di edifici di dimensioni e numero di piani maggiori e in grado di resistere, con un livello di danno minimo, a terremoti di elevata intensità. Le informazioni scientifiche raccolte in questa prova sono servite per eseguire la progettazione, coadiuvata da una serie di simulazioni numeriche in campo non lineare, di un edificio di sei piani con un impronta in pianta di 18x13m, di 1400 metri quadri totali e destinato ad ospitare 23 appartamenti, che verrà provato presso la più grande piattaforma sismica sperimentale, la E-Defence del NIED in Giappone già citata in precedenza, nel Luglio del 2009.
L'edificio è stato progettato, seguendo i princìpi stabiliti dal metodo messo a punto, con due obiettivi: in primo luogo, effettuando una analisi numerica con 44 registrazioni di terremoti considerati al massimo livello di intensità secondo le norme americane, ossia con un periodo di ritorno di 2500 anni, nell'80% dei casi il massimo spostamento interpiano misurato non doveva risultare superiore al 4% dell'altezza di piano. In secondo luogo l'edificio è stato concepito prevedendo come elementi di presidio al sollevamento delle pareti (hold-down), dei dispositivi formati da barre d'acciaio dolce collegate ai solai del piano inferiore e superiore, progettati in maniera tale da limitare il sollevamento delle pareti ad un massimo 6 mm così da ridurre al minimo i possibili danni allo stato limite di esercizio e gli eventuali effetti del secondo ordine.

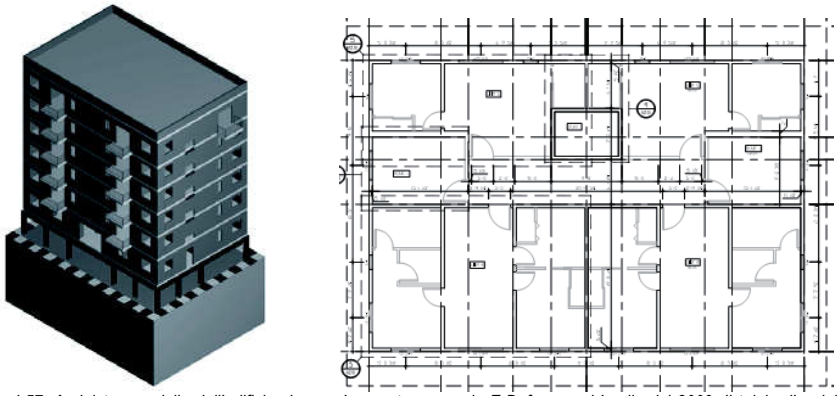


Figura 4.57: A sinistra: modello dell'edificio che verrà provato presso la E-Defence nel Luglio del 2009. Il telaio d'acciaio al piano terra verrà controventato e ancorato alla tavola vibrante. A destra: pianta del piano tipo ognuna contenente due appartamenti con una camera da letto e uno con due camere da letto.

L'edificio verrà sottoposto alla riproduzione di tre terremoti caratterizzati da una probabilità di superamento rispettivamente del 50%, 10% e 2% in 50 anni. A questo scopo verranno utilizzate esclusivamente registrazioni di terremoti Californiani: per le probabilità di superamento del 50% e 10% in 50 anni verrà utilizzata la registrazione del terremoto di Northridge (1994, M=6,7) scalata rispettivamente ad un valore dell'accelerazione di picco di 0,22g e 0,50g. Come terremoto caratterizzato da una probabilità di superamento del 2% in 50 anni è stato scelto quello di Landers (1992, M=7,3) scalato a 0,8g.
La risposta dell'edificio ad eventi di tale intensità è stata calcolata mediante il software Seismic Analysis Package for Woodframe Building (SAPWood), un programma di analisi non lineare sviluppato con un duplice obiettivo: servire come strumento di ricerca e sviluppo all'interno del progetto e come ausilio agli ingegneri che in futuro intendano progettare edifici di questa tipologia costruttiva secondo la *Performance Based Seismic Design.* Gli spostamenti massimi misurati mediante le simulazioni sono stati di 250 mm in copertura e intorno ai 100 mm al primo interpiano.

Il merito di questo progetto di ricerca, che culminerà con la prova sulla tavola vibrante E-Defence del NIED in Giappone del prototipo di edificio di 6 piani, sta proprio nello studio dettagliato e nella attenta e seria programmazione che ha seguito un preciso percorso logico; partendo dall'analisi degli attuali limiti normativi e tecnologici, passando quindi alla definizione di un metodo studiato con il preciso obiettivo di consentire una progettazione semplice, sicura ed economica di edifici in legno Platform Frame di molti piani nei confronti delle azioni sismiche, e basato sui risultati di una estesa campagna di prove sperimentali e simulazioni numeriche preliminari durata diversi anni, si giunge alla definitiva convalida del metodo proposto, dei risultati dei calcoli e delle simulazioni numeriche effettuate mediante una prova sismica su un edificio reale. Tutte le fasi intermedie del progetto di ricerca e i suoi risultati sono consultabili pubblicamente sul sito www.engr.colostate.edu/NEESWood.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] D.M. II.TT. - 14/01/08 "Norme tecniche per le costruzioni".
[2] UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 – Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Regole generali, azione sismica e regole per gli edifici.
[3] D. M. LL.PP. 16/01/1996 n.11951 "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche".
[4] Legge n° 64 del 02/02/1974 – "Prescrizioni per le zone sismiche".
[5] O.P.C.M n° 3274 20/03/ 2003 - "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
[6] O.P.C.M n° 3431 03/05/ 2005 – "Ulteriori modifiche e integrazioni all' O.P.C.M. 20/03/2003 n. 3274 recante: Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
[7] UNI EN 12512 "Strutture di legno – Metodi di prova – Prove cicliche su giunti realizzati con elementi meccanici di collegamento".
[8] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2006), *Le strutture di legno in zona sismica - Criteri e regole per la progettazione ed il restauro* II ediz., CLUT, Torino.
[9] Reiner H.J., Karacabeyli E. (2000), *Wood-frame constructions in past earthquakes, Atti del World Conference on Timber Engineering*, Whistler Resort, BC, Canada.
[10] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2007), *Quale fattore di struttura per gli edifici multipiano a struttura di legno con pannelli a strati incrociati?,* XII Convegno ANIDIS L'ingegneria sismica in Italia, Pisa.

[11] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2007), *La sperimentazione sismica sulle costruzioni di legno: attualità e prospettive*, Seminario internazionale CIAS "Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni", Cipro.
[12] Ceccotti A. (2008), *Il Progetto SOFIE e il suo marchio*, Il Giornale dell'Architettura n.65, 09/2008.
[13] John W. van de Lindt, David V. Rosowsky, Andre Filiatrault, Michael Symans, and Rachel Davidson (2009), *NEESWood: Development of a Performance-Based Seismic Design Philosophy for Mid-Rise Woodframe Construction.*

4.8 COMPORTAMENTO AL FUOCO DELLE STRUTTURE DI LEGNO

È noto che il legno è un materiale combustibile, questo però non significa che le strutture di legno non possiedano resistenza al fuoco e che siano più vulnerabili rispetto alle strutture di acciaio o di calcestruzzo armato specie se precompresso.
Incendi anche recenti di edifici importanti o di pregio nei quali erano presenti strutture lignee (Teatro La Fenice a Venezia, Cappella della Sindone a Torino, ecc.) se valutati senza senso critico possono portare alla erronea conclusione che strutture di legno e sicurezza sono difficilmente compatibili tra loro, alimentando così la convinzione che dove c'è legno c'è rischio di incendio.
Tuttavia raramente le strutture di legno contribuiscono in modo sostanziale ad alimentare un incendio ma anzi ne subiscono più spesso le conseguenze, manifestando al riguardo un comportamento almeno non peggiore se non addirittura migliore rispetto a strutture realizzate con altri materiali.

Figura 4.58: Solaio di legno non crollato a seguito di un incendio.

Figura 4.59: Trave di legno sottoposta ad incendio. Sotto lo strato carbonizzato il legno è ancora efficiente dal punto di vista meccanico.

COMPORTAMENTO DEL LEGNO NEI CONFRONTI DEL FUOCO

A riprova di quanto detto analizziamo gli aspetti salienti del comportamento di un elemento strutturale di legno soggetto ad incendio:

- il legno brucia lentamente, la carbonizzazione procede dall'esterno verso l'interno della sezione;
- il legno non ancora carbonizzato rimane efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura è aumentata;
- la rottura meccanica dell'elemento avviene quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante.

Pertanto la perdita di efficienza di una struttura di legno avviene per riduzione della sezione e non per decadimento delle caratteristiche meccaniche.
Il processo di carbonizzazione può portare alla rottura dell'elemento strutturale in un tempo compreso fra alcuni minuti primi e alcune ore, ciò in dipendenza della specie legnosa ma soprattutto delle dimensioni originarie della sezione.
Se poi si confronta il comportamento del legno con quello di altri materiali da costruzione più tradizionalmente utilizzati nel nostro paese, verso i quali normalmente non c'è alcun pregiudizio rispetto alla loro resistenza nei confronti dell'incendio non essendo materiali combustibili, si capisce ancora meglio perché il legno non parta svantaggiato, ma anzi al contrario dell'opinione comunemente diffusa possa essere considerato addirittura preferibile:

- gli elementi strutturali di acciaio non bruciano ma il materiale subisce un rapido decadimento delle caratteristiche meccaniche in funzione della temperatura;
- nelle costruzioni di calcestruzzo armato la resistenza al fuoco è determinata dallo spessore del rivestimento delle armature metalliche (copriferro);
- nelle strutture di legno i punti deboli sono le unioni che presentano elementi metallici a vista come scarpe, piastre, ecc.; queste, se non protette, sono le prime a cedere durante l'incendio.

Figura 4.60: Capannone di cemento armato completamente distrutto a seguito di un incendio; le armature metalliche perdono resistenza e rigidezza con l'aumento della temperatura, provocando rapidamente il crollo della struttura.

RESISTENZA E REAZIONE AL FUOCO

La *resistenza* e la *reazione* al fuoco sono due aspetti molto diversi della *sicurezza* al fuoco, si ritiene utile richiamerne le definizioni.

Resistenza al fuoco

(D.M.Int. 09/03/2007)
"*la capacità portante in caso di incendio, per una struttura, per una parte di struttura o per un elemento strutturale nonché la capacità di compartimentazione rispetto all'incendio per gli elementi di separazione sia strutturali, come muri e solai, che non strutturali, come porte e tramezzi*":

- R stabilità: attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;
- E tenuta: attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare né produrre - se sottoposto all'azione del fuoco su un lato - fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto;
- I isolamento termico: attitudine di un elemento da costruzione a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.

Alle strutture a sviluppo lineare (travi e pilastri) generalmente è richiesto il solo requisito R; alle strutture a sviluppo superficiale (solai e pareti), quando queste delimitano un compartimento, sono richiesti anche i requisiti E ed I.
La resistenza al fuoco è una proprietà della struttura e non del materiale che la compone, dipende dalla geometria, dai carichi agenti e dalle condizioni di esposizione; pertanto è una caratteristica che va valutata caso per caso con opportuni procedimenti di seguito esposti.

Reazione al fuoco

La reazione al fuoco è il grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto. In relazione a ciò i materiali sono assegnati alle classi 0, 1, 2, 3, 4 e 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione[4]; quelli di classe 0 sono non combustibili, come l'acciaio ed il calcestruzzo. Il legno ed i prodotti a base di legno hanno reazione al fuoco 3 o 4.
Le specifiche normative che regolano ciascuna attività fissano la classe massima di reazione al fuoco dei rivestimenti in funzione dell'uso dei locali e della posizione, ad esempio il DM 26/08/1992 "Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica" prescrive che nei passaggi quali atrii, corridoi e scale è consentito il rivestimento in classe 1 in ragione del 50% della superficie totale (pareti + soffitto + pavimento), la restante superficie dei rivestimenti deve essere di classe 0.

Il grado di reazione al fuoco è una proprietà del materiale che dipende dalla sua stessa natura e dal trattamento superficiale.

[4] In realtà tale classificazione segue secondo gli ultimi decreti ministeriali la denominazione presente nella normativa europea, anche se il concetto è sostanzialmente analogo; in questa trattazione si preferisce continuare ad utilizzare la vecchia classificazione (classi da 0 a 5) per facilità di comprensione.

VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA AL FUOCO

Il requisito di resistenza al fuoco per le strutture generalmente è limitato alla sola stabilità R; esso corrisponde al tempo che trascorre dall'inizio dell'incendio al crollo della struttura ed è espresso in minuti primi. Il requisito di reazione al fuoco non è richiesto per gli elementi strutturali quali travi e pilastri (L.C. Min. Int. 9/5/89 "Pilastri e travi di legno – Reazione al fuoco").
Per la verità la Lettera Circolare dice: "*limitatamente alle travi e pilastri in legno massiccio o lamellare, non deve essere richiesta la classificazione ai fini della reazione al fuoco*", non contempla quindi le pareti ed i solai a pannello continuo per i quali attualmente non ci sono chiare indicazioni. È opinione degli Autori che le superfici degli elementi strutturali a sviluppo superficiale (pareti e solai a pannello), costituiscano una importante frazione della superficie totale del compartimento, debbano essere trattate sia come struttura (resistenza) che come rivestimento (reazione).

La resistenza al fuoco di un elemento strutturale di legno può essere valutata in tre modi (D.M.Int. 09/03/2007):

- prove (metodo sperimentale)
- calcoli (metodo analitico)
- confronti con tabelle (metodo tabellare)

Il metodo sperimentale (prove) prevede le prove in forno su elementi di caratteristiche equivalenti agli elementi di effettivo impiego nella costruzione dello stesso tipo e dimensioni e soggetti agli stessi carichi di progetto.

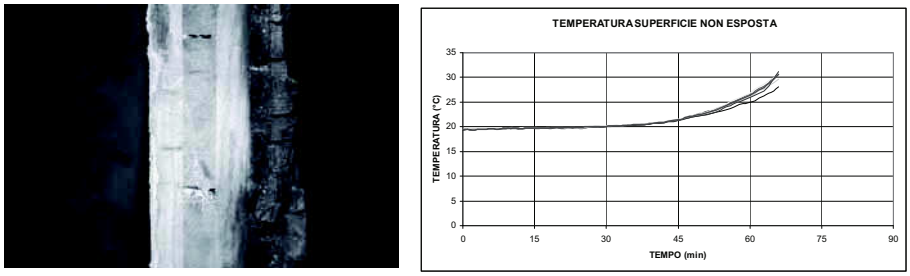


Figura 4.61: Pannello a strati incrociati da 85 mm sottoposto a prova di incendio su forno verticale della durata di 60 min nel 2007 presso il laboratorio di prove al fuoco del CNR-IVALSA a San Michele all'Adige diretto dalla Dott.ssa Giovanna Bochicchio. Nella foto la sezione del pannello al termine della prova; il pannello è formato da 5 strati ognuno di 17 mm, come si nota al termine della prova sono rimasti 3 strati praticamente intatti, pertanto si è avuta una carbonizzazione di 35-40 mm. Nel grafico a destra la variazione di temperatura durante la prova sulla superficie non esposta; mentre sulla faccia esposta al fuoco le temperature sono arrivate quasi a 1000 °C; sulla faccia non esposta si è avuto un aumento di temperatura di soli 7 °C.

Il metodo analitico (calcoli) si basa su valori di calcolo noti; tali valori sono la velocità di carbonizzazione e la resistenza meccanica, essendo il calcolo da eseguirsi allo stato limite ultimo di collasso.
Nel calcolo analitico della resistenza al fuoco le ipotesi di base sono (per EN 1995-1-2 le ipotesi sono leggermente diverse):

- la carbonizzazione procede perpendicolarmente alle superfici esposte con velocità costante;
- il legno conserva inalterate le proprie caratteristiche di resistenza e rigidezza nella parte non ancora combusta;
- la valutazione della capacità portante viene fatta sulla sezione resistente residua trascurando l'arrotondamento degli spigoli;
- il calcolo viene eseguito allo stato limite ultimo di collasso utilizzando quindi le tensioni di rottura.

I valori da assumersi nel calcolo analitico sono espressi in vari documenti (L.C.M.Int. 26/11/90 per la resistenza meccanica e D.M.Int. 8/3/85 per la velocità di carbonizzazione; norma UNI 9504 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno"), tuttavia i documenti citati devono considerarsi superati in quanto il DM Int. 16/02/2007 nell'allegato C prescrive l'utilizzo degli Eurocodici, in particolare le norme EN 1991-1-2 (Eurocodice 5) "Azioni generali – Azioni sulle strutture esposte al fuoco" e EN 1995-1-2 "Progettazione delle strutture di legno – Progettazione strutturale contro l'incendio".
L'Eurocodice 5 è il miglior documento dal punto di vista scientifico; questo documento fornisce tre metodi di calcolo, il primo dei quali (metodo della sezione efficace) è il più semplice ma anche il più cautelativo; contiene indicazioni esaustive per i giunti.

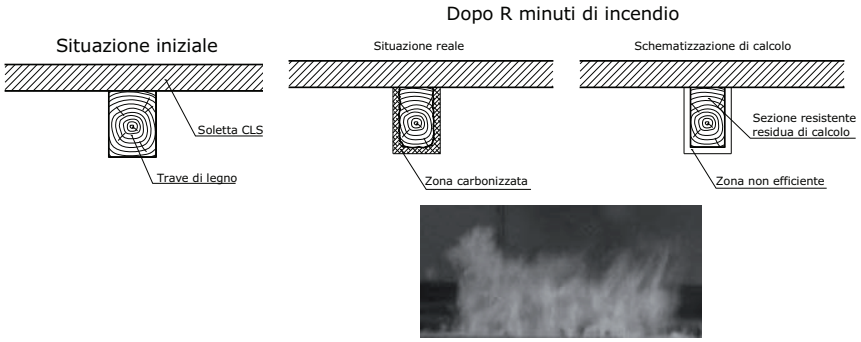


Figura 4.62: Schematizzazione utilizzata nel calcolo della resistenza al fuoco.

In particolare con riferimento ai primi due procedimenti proposti dall'Eurocodice 5 (il metodo della sezione efficace e il metodo della resistenza e rigidezza ridotte), il principio alla base del calcolo è che la sezione di legno esposta al fuoco si carbonizzi con una certa velocità (piuttosto bassa e variabile in funzione della specie legnosa) riducendo le sue dimensioni dall'esterno verso l'interno, mentre il legno non ancora carbonizzato rimane efficiente dal punto di vista meccanico anche se la sua temperatura è aumentata. La differenza fra i due metodi è che il secondo (il metodo della resistenza e rigidezza ridotte) considera che nella realtà una leggerissima riduzione delle proprietà meccaniche ed elastiche ci sia, mentre il primo le trascura per semplicità considerando in compenso e a vantaggio di sicurezza una maggiore riduzione della sezione per effetto dell'esposizione al fuoco. La rottura meccanica dell'elemento avviene quando la parte della sezione non ancora carbonizzata è talmente ridotta da non riuscire più ad assolvere alla sua funzione portante.
Nella pratica comune si utilizza normalmente il primo metodo, che pur portando ad una progettazione leggermente meno economica, risulta notevolmente più semplice del secondo.
Il calcolo delle azioni agenti viene condotto considerando il caso di situazione di progetto eccezionale come indicato nella EN 1995-1-2 secondo la seguente combinazione di carico:

$$G_K + \sum_1^n \psi_{2i} Q_{Ki}$$

dove $\psi_{2,i}$ (EN 1991-2) è il coefficiente di combinazione per combinazione di carico frequente[5].
Il metodo della sezione efficace considera come detto che le proprietà di resistenza e rigidezza del materiale rimangano invariate durante l'esposizione al fuoco. La sezione residua si calcola riducendo la sezione iniziale su ogni lato esposto al fuoco della profondità effettiva di carbonizzazione secondo la seguente equazione:

$$d_{ef} = d_{char} + k_0 d_0 = \beta_0 t_{fi,req} + k_0 d_0$$

con

β_0 velocità di carbonizzazione
$t_{fi,req}$ tempo di resistenza al fuoco richiesto (min)
k_0 coefficiente di protezione pari a 1,0 per superfici non protette
d_0 = 7 mm strato iniziale di carbonizzazione

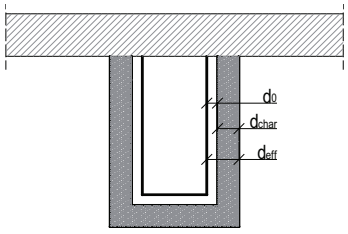


Figura 4.63: Schematizzazione di calcolo del metodo della sezione efficace.

[5] In alternativa per la progettazione al fuoco le forze interne e i momenti ($S_{f,d}$) possono essere calcolati dai valori derivati dal calcolo freddo (S_d) secondo la seguente equazione:

$$S_{f,d} = \eta \cdot S_d$$

dove η è dato dal rapporto fra i valori delle azioni per la combinazione di carico eccezionale e i valori delle azioni per la combinazione di calcolo normale allo S.L.U, ossia:

$$\eta = \frac{\sum G_{k,jd} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}}{\sum \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}}$$

Per i metodi di calcolo semplificati della sezione efficace e della resistenza e rigidezza ridotte η può essere assunto pari a 0,6 a vantaggio di sicurezza.

La resistenza di progetto si calcola secondo la seguente formula:

$$f_{L,fi,d} = k_{mod,fi} \cdot k_{fi} \cdot \frac{f_{L,k}}{\gamma_{M,fi}}$$

dove:

$f_{L,K}$ è la resistenza caratteristica;
$k_{mod,fi}$ = 1,0;
k_{fi} = 1,25 *per legno massiccio; 1,15 per il legno lamellare; questo coefficiente permette di passare dal frattile 5% al frattile 20% sulle resistenze;*
$\gamma_{M,fi}$ = 1,0.

L'Eurocodice 5 è inoltre l'unico documento normativo che fornisce indicazioni dettagliate sulla progettazione e protezione dei giunti meccanici. Infatti sono spesso i giunti realizzati con elementi metallici non protetti il punto debole di una struttura di legno nei confronti del fuoco. L'Eurocodice 5 considera che i giunti meccanici non protetti abbiano una resistenza al fuoco massima di 15 min e fornisce indicazioni costruttive e metodologie di calcolo per la protezione dei giunti meccanici e la valutazione della loro resistenza nei confronti dell'incendio.

Per il **metodo tabellare** Il D.M.Int. 09/03/2007 fornisce tabelle solo per:

- murature non portanti;
- calcestruzzo armato e precompresso (solette, solai alleggeriti, travi, pilastri e pareti);
- acciaio (travi, tiranti e pilastri).

In generale i metodi tabellari si basano su alcune prescrizioni dimensionali generalmente riferite agli spessori delle protezioni.
Tuttavia nel caso del legno, in virtù delle L.C. 07/12/87 e L.C. 26/11/90, è ammissibile la protezione dei solai con controsoffitti e degli elementi strutturali con legno.

I TRATTAMENTI IGNIFUGHI E LE PROTEZIONI

I prodotti *ignifughi* sono delle vernici trasparenti o meno che, applicate sul legno, ritardano l'ignizione, cioè rendono il legno meno facilmente infiammabile e quindi lo abbassano di classe di reazione al fuoco, fino a portarlo in classe 1; per tale motivo sarebbe più opportuno parlare di prodotti *igniritardanti*. Al momento non esistono in commercio prodotti che rendono il legno non combustibile.

Tali prodotti devono essere omologati, l'omologazione è possibile solo nei confronti della reazione al fuoco.
Il periodo di efficacia del prodotto non può essere superiore a 5 anni, pertanto dopo tale periodo il prodotto deve essere rimosso e riapplicato.
Ritardando l'ignizione in realtà tali prodotti aumentano anche la resistenza al fuoco, tale aumento è però generalmente non superiore ai 10 minuti e pertanto poco utile.

I prodotti ignifughi rivestono il legno limitandone fortemente la traspirazione, per tale motivo non possono essere applicati su legno massiccio non sufficientemente stagionato altrimenti, non permettendo la rapida stagionatura del legno, ne provocano la marcescenza.

Ai fini della resistenza al fuoco le protezioni di elementi strutturali di legno con legno sono ammesse (L.C. Min. Int. 26/11/1990 "Resistenza di strutture portanti in legno"), in tal caso la resistenza al fuoco è aumentata del tempo occorrente alla combustione delle tavole di protezione.
Anche le protezioni con controsoffitti e cartongesso sono ammesse (L.C. 07/12/87 "Strutture in legno – Controsoffitti"), in questo caso è però necessario che le protezioni siano classificate per conferire alle strutture di acciaio una resistenza uguale o superiore a 45 minuti.
L'Eurocodice 5 tratta in maniera esaustiva il calcolo della resistenza al fuoco in presenza di protezioni.

IL CARICO DI INCENDIO PER I LOCALI A STRUTTURA DI LEGNO

Anche la struttura di legno, essendo combustibile, partecipa all'incendio e pertanto costituisce carico di incendio.
Tuttavia nel calcolo del carico di incendio andrà considerata la sola parte di legno che, in base alla velocità di carbonizzazione, si presume venga bruciata nel tempo corrispondente alla classe richiesta.
Essendo però la classe richiesta funzione del carico di incendio, è necessario che il progettista faccia almeno una iterazione: si calcola il carico di incendio prescindendo dalla presenza della struttura di legno, in funzione del carico di incendio si calcola la classe richiesta dell'edificio, si calcola la quantità di legno della struttura che si carbonizza in tale tempo, si ricalcola il carico di incendio e quindi la classe dell'edificio comprendendo anche il legno della struttura che si carbonizza.

Dall'esame della normativa antincendio si evince che non esiste alcun divieto all'utilizzo del legno per le strutture portanti; per le nuove strutture la possibilità di aumentare la resistenza al fuoco semplicemente aumentando la

sezione o proteggendo l'elemento strutturale con legno o altri materiali consente di usare con fiducia il legno anche negli edifici soggetti a prevenzione incendi.

Il progetto SOFIE

Nell'ambito del Progetto SOFIE (già descritto nel paragrafo 4.7) in data 6 Marzo 2007 si è tenuta presso il campo sperimentale per le prove al fuoco del Building Research Institute a Tsukuba in Giappone una prova di incendio reale su un edificio interamente a struttura di legno di tre piani realizzato con pannelli di legno massiccio a strati incrociati.

Figura 4.64: Un momento della prova durante la fase di incendio pienamente sviluppato (fonte www.progettosofie.it).

L'incendio è stato fatto partire da una stanza posta al primo piano dell'edificio ad un carico d'incendio pari al doppio di quello presente in una normale stanza di albergo; le fiamme, come previsto, una volta che l'incendio si è pienamente sviluppato sono fuoriuscite dalle finestre, lambendo le pareti esterne fino ad arrivare al piano superiore. L'incendio ha interessato marginalmente le strutture dell'edificio e il fumo ed il fuoco non si sono assolutamente propagati agli alti locali. Dopo 60 minuti il fuoco è stato rapidamente estinto con l'uso di idranti. L'edificio ha riportato solo danni locali facilmente riparabili.
La simulazione fatta presso il Building Research Institute intendeva dimostrare come un edificio di tre piani, interamente realizzato con struttura di legno e completato con i materiali costruttivi usualmente utilizzati per i rivestimenti sia interni che esterni (isolamento termico e acustico, infissi e finiture), potesse resistere ad un incendio reale della durata di un'ora senza subire alcun danno irreversibile alle strutture portanti e senza causare serio pericolo agli occupanti, dimostrando una perfetta tenuta non solamente nei confronti delle fiamme, ma anche nei confronti del pericolo di passaggio di fumi e propagazione dell'incendio da un ambiente all'altro.
La prova ha quindi dato esiti eccellenti, addirittura superiori a quanto ipotizzato mediante le simulazioni numeriche effettuate sulla base dei risultati di prove preliminari effettuate in Italia presso il Laboratorio di Resistenza e Reazione al Fuoco dell'IVALSA-CNR.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] D.M.Int. 09/03/2007 – "Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco".
[2] DM 26/08/1992 "Norme di prevenzione incendi per l'edilizia scolastica"
[3] L.C. Min. Int. 9/5/89 "Pilastri e travi di legno – Reazione al fuoco".
[4] UNI EN 1995-1-2: Eurocodice 5 – Progettazione delle strutture di legno – Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio.
[5] L.C.M.Int. 26/11/90 - "Resistenza di strutture portanti in legno".
[6] D.M.Int. 8/3/85 - Direttive sulle misure più urgenti ed essenziali di prevenzione incendi ai fini del rilascio del nullaosta provvisorio di cui alla legge 7 dicembre 1984, n. 818".
[7] UNI 9504 "Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno".
[8] L.C. 07/12/87 - "Strutture in legno – Controsoffitti".
[9] Follesa M., Lauriola M.P., *La resistenza al fuoco delle strutture di legno*, Recupero e Conservazione n° 39, De Lettera Editore, Milano.

[10] Comunicato stampa n. 605 del 14/3/2007 – Provincia Autonoma di Trento.
[11] Bochicchio G., Ceccotti A., Frangi A., Lauriola M.P. (2008), *Natural full-scale fire test on a 3 storey XLam timber building*, Proceedings of 10th World Conference on Timber Engineering (WCTE), Miyazaki, Japan.

Capitolo 5

Edifici a struttura di legno

5.1 SISTEMI COSTRUTTIVI: TIPOLOGIE, CARATTERISTICHE E COMPORTAMENTO STRUTTURALE

Esistono al mondo diversi metodi costruttivi per realizzare edifici a struttura di legno che hanno avuto origine principalmente in regioni dotate di grandi estensioni boschive e climi piovosi e si sono sviluppati secondo le diverse tradizioni costruttive. Ogni sistema ha le proprie caratteristiche distintive che lo differenziano dagli altri per il comportamento strutturale o per gli aspetti estetico-architettonici o ancora per i dettagli costruttivi e che lo rendono più o meno adatto in determinati contesti climatici e ambientali, ma tutti immancabilmente offrono gli stessi vantaggi:

- estrema semplicità e velocità di esecuzione, grazie alla leggerezza del materiale che consente facilità di trasporto e maneggevolezza nell'utilizzo in cantiere e all'assenza di getti (per un cantiere di un edificio a struttura di legno si ragiona in termini di settimane mentre per un edificio di cemento armato o di muratura di mesi o talvolta anni);
- gli edifici in legno facilitano il montaggio di elementi tecnologici integrati. Realizzata la struttura portante, sia le componenti impiantistiche che di finitura possono essere montate a secco direttamente sul supporto ligneo mediante semplice ferramenta. Non è un caso che la maggior parte degli edifici realizzati in autocostruzione siano edifici in legno. Le dimensioni ridotte degli elementi portanti consentono la realizzazione di vani ed intercapedini porta impianti e di climatizzazione naturale con sezioni non realizzabili con altri sistemi. Tutto questo consente anche di avere costi di manutenzione minimi rispetto ad altri sistemi costruttivi;
- elevata durata nel tempo (fatta salva la corretta progettazione, si veda a proposito la già citata pagoda del tempio di Horju-ji a Nara del 607 d.C.) e costi di manutenzione non superiori a quelli di un edificio realizzato con altri materiali;
- buon isolamento termo-acustico; il legno di per sé è un ottimo isolante termico e un buon isolante acustico. Avendo cura nella scelta del tipo di isolante adatto alla situazione climatica esistente così come nella previsione di dettagli progettuali adeguati che ne garantiscano il corretto funzionamento (barriera al vapore, intercapedine di ventilazione in parete ed in copertura), si ottengono livelli di comfort termico anche migliori di quelli degli edifici realizzati con materiali tradizionali. Inoltre l'utilizzo di materiali naturali a base di legno o suoi derivati per il pacchetto isolante contribuisce a migliorare la traspirabilità complessiva dell'involucro migliorando il comfort e la salubrità dell'edificio;
- ottimi requisiti strutturali. Le strutture di legno hanno una eccellente resistenza alle azioni sismiche e, al contrario dell'opinione comunemente diffusa, un comportamento al fuoco prevedibile e addirittura migliore, per certi versi, rispetto ad altri materiali da costruzione non combustibili. Si vedano a questo proposito i paragrafi relativi;
- costi contenuti e competitivi rispetto agli altri materiali, principalmente in virtù dei ridotti tempi di realizzazione e dei conseguenti minori imprevisti in corso d'opera. Le strutture di fondazione, generalmente previste in c.a., sono più leggere rispetto ad analoghe realizzazioni in materiali tradizionali e pertanto si riducono i costi del materiale da utilizzare e i tempi di realizzazione.

La scelta del sistema costruttivo più adatto alle esigenze progettuali deve essere fatta in funzione di un insieme di richieste, limitazioni (imposte ad es. dai regolamenti edilizi), funzioni e caratteristiche definite di concerto da un team di soggetti comprendenti il committente, il progettista architettonico, il progettista strutturale, il geologo, il progettista degli impianti, l'impresa ma, a differenza degli altri materiali da costruzione, anche il tecnologo del legno e il fornitore del legno strutturale. Ad esempio nella fase della progettazione iniziale dell'edificio e dello sviluppo degli schemi architettonici preliminari il progettista strutturale dovrebbe, allo stesso tempo, sviluppare più alternative che assicurino sia il soddisfacimento dell'idea architettonica che quelle relative ai vari requisiti tecnici ed economici e quindi tenere in considerazione le esigenze espresse dal committente, ma anche le indicazioni del tecnologo del legno, importanti per la corretta definizione dei particolari costruttivi, e del fornitore del materiale, necessarie per capire quali siano le specie legnose disponibili.

Pertanto è necessaria una conoscenza approfondita delle proprietà del materiale e delle caratteristiche particolari dei vari sistemi costruttivi che possono essere utilizzati, per capire quale è il più adatto a soddisfare le diverse esigenze.
In questo capitolo verranno descritte le caratteristiche costruttive e i principi di progettazione relativi ai sistemi costruttivi maggiormente diffusi e utilizzati, in modo da dare un quadro il più completo possibile a tutti coloro, committenti, progettisti ma anche tecnici delle pubbliche amministrazioni, che si trovino a dover affrontare o valutare le scelte effettuate nella progettazione di un edificio a struttura di legno.

EDIFICI A PANNELLI PORTANTI

Il sistema a pannelli portanti è forse l'ultimo arrivato tra i sistemi costruttivi per la realizzazione di edifici a struttura di legno, ciò nonostante in pochi anni è già diventato il sistema costruttivo più diffuso in Europa per la realizzazione di edifici di legno.
Il nome deriva dal componente strutturale principale che lo caratterizza, ossia il **pannello di legno massiccio a strati incrociati** con il quale vengono realizzate le pareti e i solai di questi edifici, i quali, per robustezza e solidità, tra quelli costruiti con struttura portante di legno, sono forse i più simili al concetto di edificio in muratura ben radicato nella tradizione costruttiva europea e italiana.

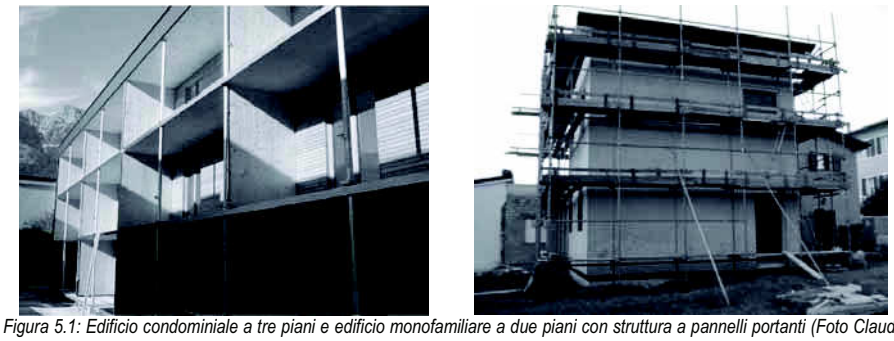


Figura 5.1: Edificio condominiale a tre piani e edificio monofamiliare a due piani con struttura a pannelli portanti (Foto Claudio Cavazzuti).

Origini e caratteristiche generali

Il sistema trae origine, come detto in precedenza, dal prodotto *pannello a strati incrociati* ideato e sviluppato per la prima volta in Germania nella prima metà degli anni 90, e ha conosciuto negli ultimi 10-15 anni un rapido e crescente sviluppo in tutta Europa fino a diventare allo stato attuale probabilmente il sistema più utilizzato nella realizzazione di edifici a struttura di legno. Il pannello a strati incrociati è un prodotto formato dalla sovrapposizione di strati di tavole di legno massiccio disposti ortogonalmente fra loro collegati mediante incollaggio o chiodatura. La parete chiodata, in cui gli strati vengono resi collaboranti attraverso l'inserimento di chiodi di alluminio, se da un lato è sicuramente più apprezzabile dal punto di vista della eco-sostenibilità, in quanto il suo processo produttivo non comporta l'utilizzo di collanti o sostanze chimiche, dall'altro è anche meno rigida e resistente e pertanto, a parità di prestazioni strutturali richieste, comporta un maggiore utilizzo di materia prima rispetto alla parete incollata (generalmente per un edificio fino a tre piani il pannello a strati incrociati incollato raggiunge per le pareti uno spessore massimo di 10-12 cm, mentre utilizzando un pannello chiodato si hanno spessori circa doppi). Con il sistema a pareti chiodate inoltre vengono realizzate le sole pareti, in quanto i pannelli non forniscono prestazioni di resistenza e rigidezza tali da poter essere utilizzati anche come solai. Per le caratteristiche, il metodo e i requisiti di produzione dei pannelli e i riferimenti normativi sulla certificazione del prodotto si rimanda al §3.4.

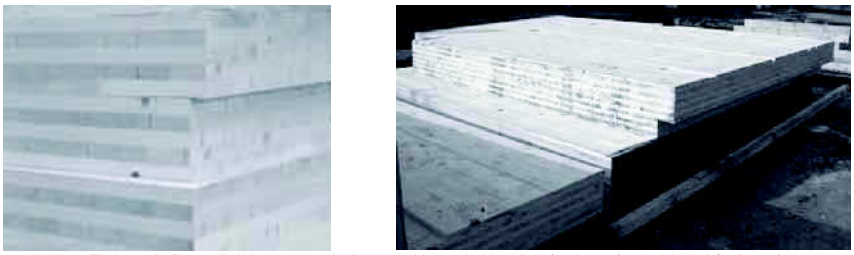


Figura 5.2: Pannelli di legno massiccio a strati incrociati incollati (a sinistra) e inchiodati (a destra).

Un edificio a pannelli portanti è sostanzialmente una struttura scatolare in cui le pareti e i solai sono formati da diaframmi costituiti da pannelli di legno massiccio molto rigidi e resistenti, collegati fra loro mediante collegamenti meccanici. I pannelli per le pareti e i solai vengono prefabbricati in stabilimento mediante il taglio computerizzato con macchine a controllo numerico e arrivano in cantiere pronti per il montaggio già dotati di aperture per porte e finestre. La grande versatilità del sistema consente di realizzare sia edifici residenziali mono o bi-piano di piccole dimensioni, che edifici condominiali multipiano anche di grandi dimensioni (dal punto di vista strutturale non ci sono limitazioni al numero di piani), oppure edifici di conformazione e destinazione d'uso diversa come edifici scolastici, alberghi, ospedali o edifici industriali.
Rispetto ad altri sistemi costruttivi come il Platform o i sistemi intelaiati, che vedremo più avanti, il sistema a pannelli portanti comporta indubbiamente un maggior utilizzo di materia prima. D'altra parte il pannello, in particolar modo quello incollato, è di per sé molto rigido e resistente proprio in virtù del processo produttivo con cui è realizzato e pertanto consente l'utilizzo di legno strutturale classificato di qualità inferiore, difficilmente utilizzabile in altri sistemi costruttivi.

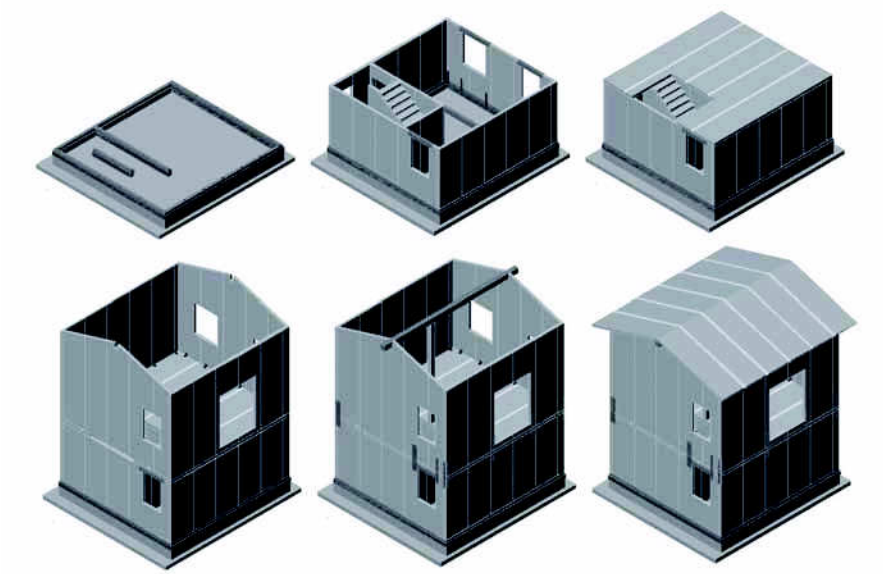


Figura 5.3: Fasi costruttive di un edificio a pannelli portanti.

Processo costruttivo

La costruzione di un edificio a pannelli portanti parte, come per tutti gli edifici, dalle **fondazioni** (Figura 5.3) che vengono realizzate o con una platea o con travi rovesce in c.a. Se viene utilizzata una platea di fondazione è comunque buona norma realizzare sopra di essa un piccolo cordolo in c.a. oppure in legno per evitare il contatto diretto delle pareti di legno con la platea stessa. Talvolta il cordolo può essere evitato se le strutture di fondazione fuoriescono dal livello del terreno. In tutti i casi tra la struttura di legno e la fondazione in c.a. va interposto uno strato di guaina bituminosa che deve risvoltare sulla struttura di fondazione (e non sulla parete di legno) per evitare di creare delle trappole di umidità.
Il cordolo di legno, quando previsto, deve essere realizzato con una specie legnosa durabile (ad es. larice) e può essere di legno massiccio o lamellare. E' bene che non superi un'altezza di 100-120 mm per non rendere difficoltoso il successivo collegamento delle pareti alle fondazioni generalmente effettuato con piastre metalliche angolari.
Talvolta, al contatto fra la parete e le fondazioni, oltre alla guaina viene posizionato un ulteriore strato di gomma, utilizzato anche in tutte le zone di contatto fra le pareti ortogonali e fra pareti e solaio, usato non solo con la funzione di impedire il passaggio dell'aria attraverso le zone di contatto, ma anche come smorzatore acustico (Figura 5.5).

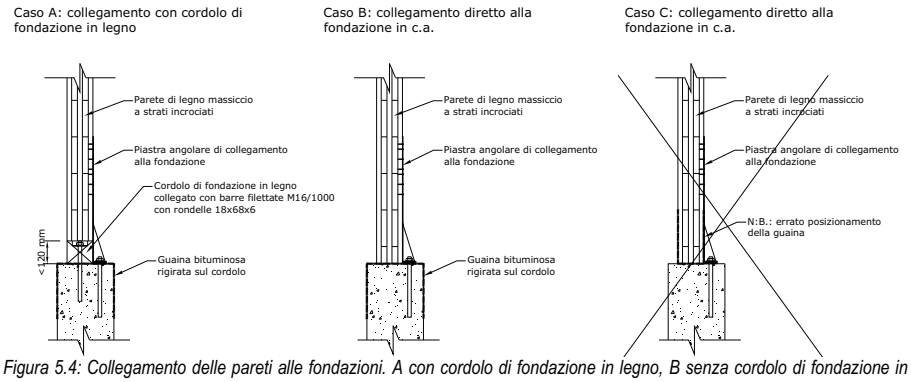

Caso A: collegamento con cordolo di fondazione in legno
Caso B: collegamento diretto alla fondazione in c.a.
Caso C: collegamento diretto alla fondazione in c.a.
Parete di legno massiccio a strati incrociati
Piastra angolare di collegamento alla fondazione
Cordolo di fondazione in legno collegato con barre filettate M16/1000 con rondelle 18x68x6
Guaina bituminosa rigirata sul cordolo
<120 mm
Parete di legno massiccio a strati incrociati
Piastra angolare di collegamento alla fondazione
Guaina bituminosa rigirata sul cordolo
Parete di legno massiccio a strati incrociati
Piastra angolare di collegamento alla fondazione
N:B.: errato posizionamento della guaina

Figura 5.4: Collegamento delle pareti alle fondazioni. A con cordolo di fondazione in legno, B senza cordolo di fondazione in legno, C con errato posizionamento della guaina.

Figura 5.5: Posizionamento di uno strato di gomma al contatto fra parete e cordolo.

Il collegamento delle pareti del piano terra alle fondazioni deve svolgere una duplice funzione: impedire che per effetto delle azioni orizzontali (vento o sisma), agenti nel piano stesso della parete e in generale su tutto l'edificio si possa verificare sia il ribaltamento che lo scorrimento rispetto alle fondazioni. Il ribaltamento viene solitamente contrastato con delle piastre angolari allungate, dette comunemente *hold-down* (dall'inglese hold down ossia appunto tieni giù). Gli hold-down vengono collegati alle pareti di legno con chiodi o viti e alle fondazioni in calcestruzzo con delle barre filettate in acciaio inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica. Devono essere posizionati in corrispondenza dei limiti estremi delle pareti e in prossimità delle aperture. I chiodi (meglio se ad aderenza migliorata) e le viti di collegamento alla parete hanno diametri variabili dai 3 ai 6 mm e le barre filettate dai 12 ai 18 mm a seconda del tipo di hold-down e dei carichi in gioco.
Lo scorrimento invece può essere contrastato in vari modi, a seconda del metodo di collegamento delle pareti alle fondazioni. Nel caso di presenza di cordolo di legno di interposizione fra le pareti e la fondazione, deve essere previsto un doppio collegamento del cordolo di legno alle fondazioni, realizzato sempre con barre filettate, e della parete al cordolo di legno, garantito con viti auto-foranti (diametro di 8-10 mm) inserite inclinate sui due lati della parete. Talvolta, per pareti di grosso spessore (ad es. nel caso di pannelli chiodati), il cordolo ha una larghezza inferiore rispetto allo spessore della parete che poggia parzialmente sulle fondazioni in c.a. e le viti di collegamento possono essere inserite orizzontalmente. Nel caso invece di parete collegata direttamente al cordolo di fondazione solitamente si prevedono delle staffe angolari di acciaio collegate con chiodi o viti alle pareti (diametri come sopra) e sempre con tirafondi in acciaio alle fondazioni (diametro sempre 12-18 mm. Figura 5.6).

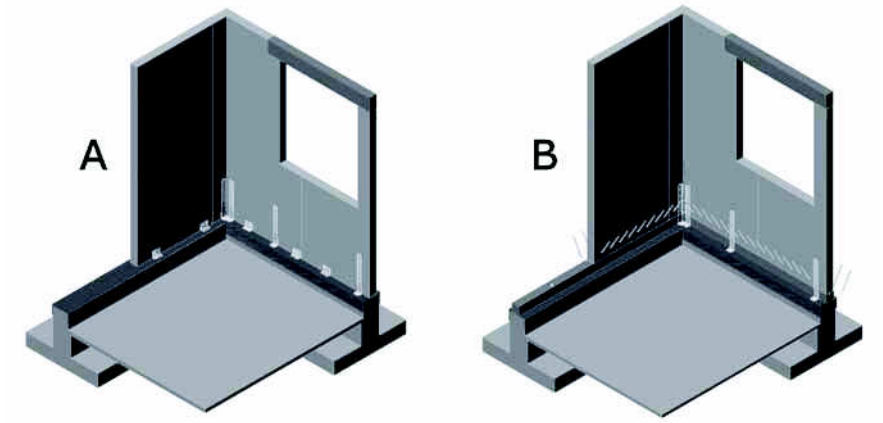


Figura 5.6: Collegamento delle pareti alle fondazioni. A: pareti direttamente collegate al cordolo di calcestruzzo, B: pareti collegate mediante l'interposizione di un cordolo di legno.

Le **pareti** possono essere costituite da pannelli interi fino a una lunghezza massima di 10-12 metri e con una altezza pari all'altezza di interpiano, preparati in stabilimento mediante il taglio con macchine a controllo numerico e già completi di aperture. Una volta arrivate in cantiere vengono issate con mezzi meccanici di sollevamento e collegate fra loro e alle fondazioni. Più frequentemente però, soprattutto per esigenze di trasporto e facilità di maneggevolezza e montaggio in cantiere, vengono suddivise in pannelli di larghezze variabili a seconda del produttore fino ad un massimo di 3m e collegate fra loro con la realizzazione di giunti verticali. Questi ultimi vengono solitamente eseguiti con l'interposizione di una striscia di pannello multistrato a base di legno che può essere inserito in apposite fresature internamente alla parete o su una sua faccia. Talvolta viene realizzato anche un giunto a mezzo legno a tutta altezza. Il collegamento avviene sempre mediante l'inserimento di viti auto-foranti di diametro variabile dai 6 ai 10 mm e interasse variabile in funzione dei carichi (Figura 5.7).

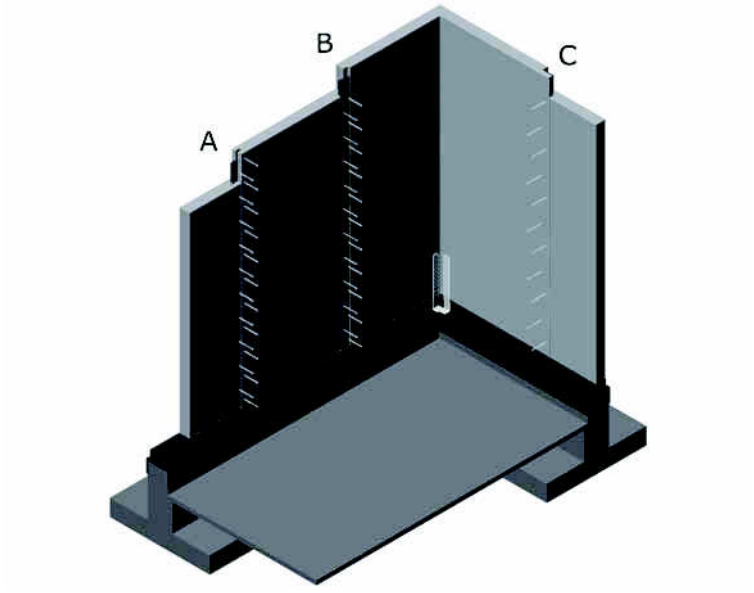


Figura 5.7: Tre diversi modi di realizzare il giunto verticale fra pannelli parete. A: con striscia di pannello multistrato inserita in fresatura interna ai pannelli e viti, B: con striscia di pannello multistrato inserita in fresatura sul lato interno parete e viti, C: con giunto a mezzo legno a tutta altezza e viti.

La realizzazione delle pareti mediante il collegamento meccanico verticale di più pannelli conferisce al sistema costruttivo anche una maggiore duttilità, e pertanto una maggiore capacità di dissipare l'energia prodotta dal

sisma, rispetto al caso delle pareti realizzate in un unico pezzo; questo significa in sostanza un migliore comportamento dell'intero edificio in caso di terremoto.
In fase di montaggio i pannelli parete vengono serrati fra loro mediante l'utilizzo di un attrezzo apposito a cric chiamato *tiratravi* che con due ramponi infilati a martello aggancia i pannelli da accostare e, agendo sul cric, li avvicina fra loro (Figura 5.8). La stessa tecnica viene utilizzata nel montaggio per accostare i pannelli delle pareti ortogonali e i pannelli del solaio.

Figura 5.8: Serraggio dei pannelli parete con tiratravi.

Il collegamento fra pareti ortogonali avviene sempre mediante l'inserimento di viti auto-foranti. Occorre però fare attenzione al corretto posizionamento delle viti. Infatti nel caso A e B (Figura 5.9) la vite viene infissa in uno strato con fibratura parallela all'asse della vite (inserimento di testa) e pertanto l'unione è totalmente inefficace. Il caso C sarebbe corretto in quanto si va a intercettare lo strato a fibratura ortogonale ma è molto difficile da realizzare a meno di preparare una dima che faccia da guida per l'infissione delle viti alla corretta distanza dal bordo della parete. La cosa migliore è realizzare il collegamento con la vite infissa con asse leggermente inclinato rispetto alla direzione del piano della parete come nei casi D ed E. In questo modo siamo assolutamente sicuri di andare a intercettare gli strati di tavole a fibratura ortogonale e quindi siamo sicuri dell'efficacia del collegamento.

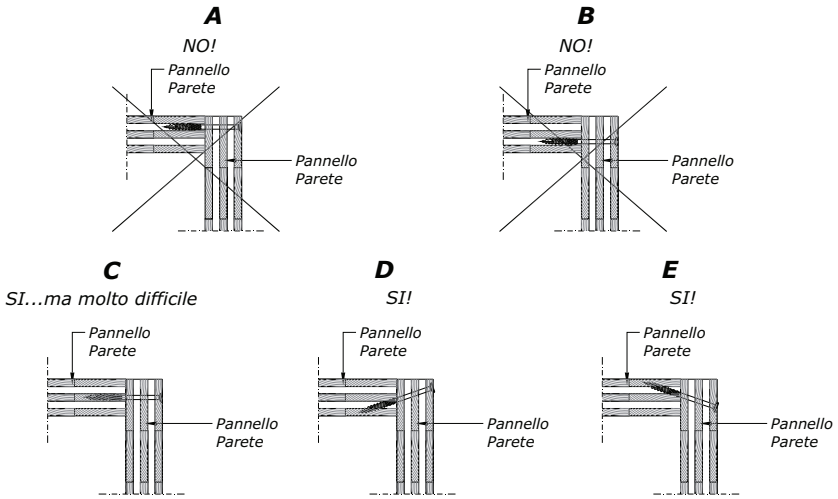


Figura 5.9: Collegamento verticale fra pannelli parete ortogonali con viti auto-foranti.

Una volta montate le pareti del piano terra è possibile posare il primo **solaio**. Quest'ultimo è formato da pannelli a strati incrociati di spessore solitamente maggiore di quello delle pareti, ovviamente in funzione delle luci e dei carichi che poggiano sulle pareti del piano inferiore e su travi di legno lamellare quando previste. Anche per il solaio, per esigenze di trasporto e montaggio, si preferisce il montaggio a pannelli di larghezza inferiore ai 3 m, che vengono poi collegati fra loro mediante giunti orizzontali realizzati con le stesse tecniche utilizzate per la realizzazione dei giunti verticali fra pannelli parete.
In questo caso, a differenza di quanto detto per le pareti, per un migliore comportamento nei confronti delle azioni sismiche, sarebbe più opportuna la realizzazione di una lastra unica di legno per tutto il solaio. In ogni caso, il

posizionamento ravvicinato delle viti lungo i giunti orizzontali fra i pannelli, consente di realizzare dei giunti sufficientemente rigidi tali da ritenere soddisfatta l'ipotesi di diaframma infinitamente rigido per l'intero solaio. E' comunque buona norma costruttiva, quando possibile, sfalsare la posizione dei giunti orizzontali fra i pannelli del solaio rispetto a quelli verticali della parete.
Il collegamento alle pareti sottostanti viene effettuato sempre mediante l'utilizzo di viti auto-foranti. Anche per questo collegamento vale lo stesso discorso fatto per il collegamento verticale fra pareti ortogonali, ossia è opportuno inserire le viti con asse leggermente inclinato rispetto all'asse della parete per avere la certezza di intercettare gli strati di tavole della parete con fibratura ortogonale rispetto all'asse della vite (Figura 5.10).
Il collegamento fra le pareti ortogonali, in particolar modo agli angoli esterni e il collegamento fra i pannelli del solaio e le pareti sottostanti viene effettuato sempre con l'inserimento di viti auto-foranti e deve essere sufficientemente rigido per garantire il corretto comportamento strutturale scatolare dell'intero edificio. A questo scopo, la realizzazione della connessione con viti di 10 mm di diametro poste a 100-150 mm di interasse è da considerarsi sufficiente.

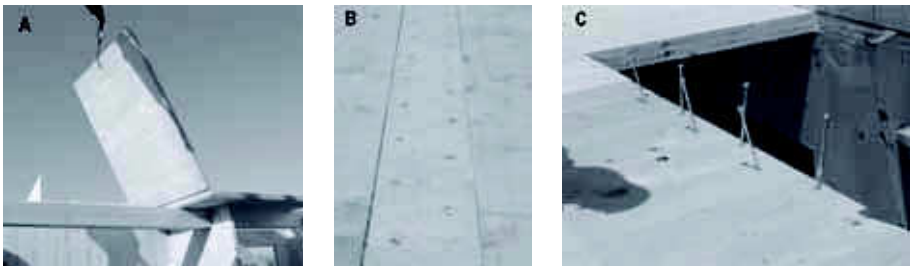


Figura 5.10: Collegamenti pannelli solaio: A: con giunto a mezzo legno, B con striscia di pannello sull'estradosso, C: collegamento alle pareti sottostanti con viti auto-foranti inclinate rispetto al piano della parete.

Una volta realizzato il primo solaio il processo costruttivo si ripete: ossia il primo solaio fa da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi. Le pareti del primo piano devono essere collegate al solaio del piano terra sempre con mezzi di collegamento meccanico (piastre metalliche angolari, chiodi e viti) di presidio al sollevamento e allo scorrimento, con le stesse modalità del collegamento alle fondazioni. Per il sollevamento si possono continuare ad utilizzare gli stessi hold-down utilizzati in fondazione che però questa volta andranno posti a coppie di due, uno sopra e uno sotto il solaio, collegati da un bullone, per garantire la trasmissione dell'azione di sollevamento dalla parete del piano superiore a quella del piano inferiore. In alternativa possono essere utilizzate delle più pratiche bande forate da collegare esternamente alla parete con chiodi sia alla parete del piano inferiore che a quella del piano superiore (Figura 5.11).

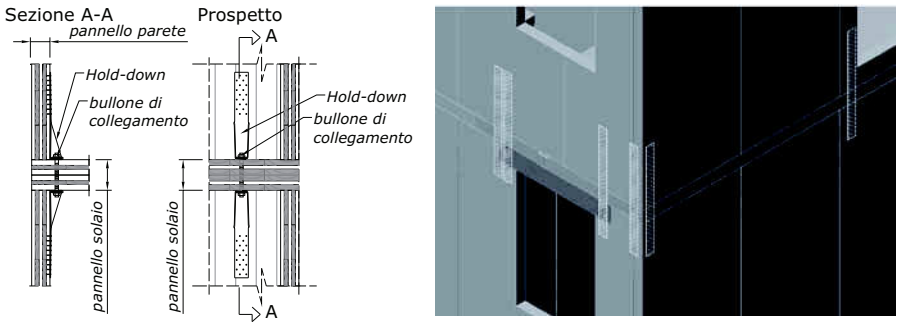


Figura 5.11: Collegamenti pareti-solaio di interpiano di presidio al sollevamento: a sinistra, con hold-down posti sopra e sotto il solaio dall'interno; a destra con bande forate dall'esterno.

La **copertura** può essere realizzata a pannelli oppure con metodo tradizionale, ovvero con travi principali, secondarie e sovrastante tavolato a doppio strato incrociato o pannello a base di legno. Il collegamento, nel caso di copertura a pannelli avviene come per i solai, mentre nel caso di copertura a travi il metodo di prefabbricazione in stabilimento dei pannelli consente di realizzare con estrema precisione le sedi di alloggio per le travi di copertura che poi possono essere più praticamente collegate con l'utilizzo sempre di viti auto-foranti oppure viti a doppio filetto o in alternativa anche con le classiche scarpe metalliche (che però in caso di edifici pubblici soggetti a requisiti di resistenza al fuoco vanno adeguatamente protette con pannelli di rivestimento. Figura 5.12).

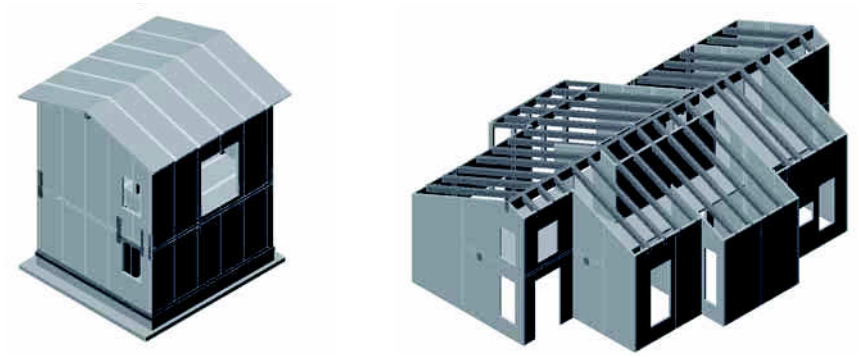


Figura 5.12: Copertura a pannelli (a sinistra) e copertura tradizionale a travi (a destra).

Una volta terminata la struttura, l'edificio viene completato con i **pacchetti costruttivi per pareti e solai**. Dal lato esterno della parete viene posto un cappotto isolante solitamente formato da pannelli di fibra di legno, rete porta-intonaco e intonaco, o in aggiunta e/o in alternativa si utilizzano pannelli di lana di legno mineralizzata e di fibra di canapa o di sughero o doghe di legno per il rivestimento esterno. Dal lato interno invece si prevede una intercapedine di 2-4 cm all'interno della quale far passare l'impianto elettrico, riempita generalmente con lana minerale o anche con lana di legno e rivestita internamente con pannelli di cartongesso singoli o doppi. La parete così composta, partendo da un pannello strutturale che può avere spessori variabili dagli 8 ai 20 cm in media, arriva ad uno spessore complessivo di 20-35 cm con un aspetto è una solidità molto simile a quella di una parete di muratura (Figura 5.13).

Il solaio viene invece completato dal lato inferiore sempre con cartongesso che può essere direttamente collegato al pannello di legno oppure lasciando, come per il lato interno delle pareti, un'intercapedine, mentre dal lato superiore viene posto uno strato di sabbia o altro materiale inerte per aumentare la massa, un massetto porta-impianti in calcestruzzo e la pavimentazione. Talvolta fra lo strato di sabbia e il massetto di calcestruzzo può essere inserito uno strato di composto elastomerico, ossia gomma, come disacoppiante acustico oppure uno strato di isolante (fibra di legno ad es.) come isolamento termo-acustico. Si veda a proposito §5.7.

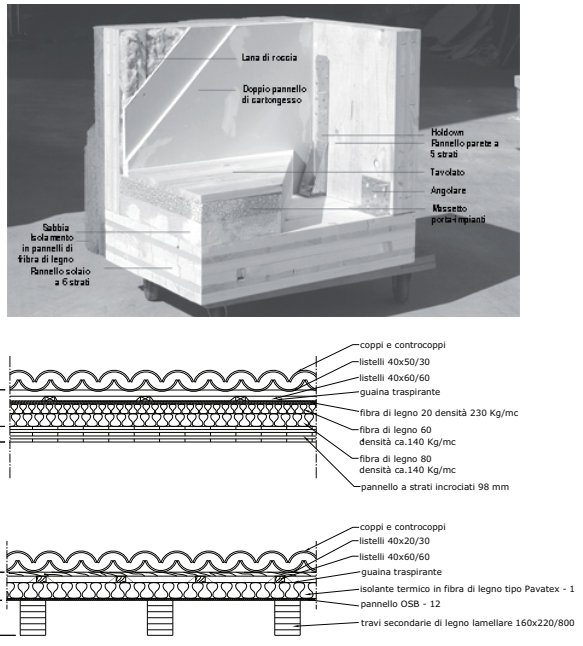


Figura 5.13: Pacchetti costruttivi per parete e solaio e schemi di dettaglio del pacchetto copertura a pannelli e tradizionale.

Il pacchetto costruttivo della copertura varia in funzione della struttura portante, delle condizioni climatiche e delle tradizioni costruttive. Se si parte da una copertura a pannelli il pacchetto viene solitamente completato con

pannelli di isolante (fibra di legno generalmente) con spessori variabili tra gli 8 e i 16 cm, sovrastante tavolato o pannello di compensato o OSB, guaina traspirante, doppia orditura di listelli (per ventilazione e porta-tegole) e manto di copertura. Sul lato interno viene solitamente posto il cartongesso, o direttamente fissato sul pannello di copertura o con intercapedine di 2-3 cm per passaggio impianti fissato su listelli. Nel caso di copertura a travi, se le stesse vengono lasciate a vista, sopra di esse viene fissato un tavolato semplice o doppio (con il secondo strato disposto a 45° rispetto al primo preferibilmente) ripetendo poi lo stesso pacchetto costruttivo precedentemente descritto. Se le travi non vengono lasciate a vista, l'isolante viene posto nell'intercapedine di altezza pari all'altezza delle travi e il pacchetto viene completato superiormente con tavolato, guaina traspirante, listelli, controlistelli e manto. Per i dettagli costruttivi di pareti, solai e copertura si rimanda al §5.7.

EDIFICI PLATFORM FRAME

Il sistema Platform Frame è forse il sistema costruttivo più diffuso al mondo per la realizzazione di edifici a uno o più piani a struttura di legno. La quasi totalità degli edifici mono e bi-familiari ma anche dei condomini residenziali in Nordamerica sono costruiti con questo sistema, che ha una grande diffusione anche in altre regioni del globo, dall'estremo Oriente (Giappone e recentemente anche Cina) al Nord Europa.
L'enorme diffusione ha fatto sì che questo sia anche il sistema più presente, per indicazioni progettuali e costruttive, nelle normative per le costruzioni di svariati paesi.

Figura 5.14: Edifici a quattro e tre piani costruiti con il sistema Platform Frame a Vancouver, BC, Canada.

Origini e caratteristiche generali

Un edificio realizzato con il sistema Platform Frame è formato da pareti e solai costituiti da intelaiature di elementi di legno di piccola sezione (generalmente 4x9 o 5x10 cm) posti ad interasse costante di 40-60 cm alle quali da un lato o da entrambi i lati vengono collegati, con tanti chiodi o viti di piccolo diametro, dei pannelli di legno strutturale, ossia generalmente compensato o OSB (per le caratteristiche dei pannelli a base di legno si veda §3.3). Le pareti e i solai così realizzati vengono collegati fra loro e alle fondazioni con piastre metalliche angolari, tirafondi, viti e chiodi in maniera molto simile a quanto viene fatto per il sistema a pannelli portanti visto in precedenza.
Il sistema deve il suo nome al metodo costruttivo che come vedremo è per certi versi molto simile al sistema a pannelli portanti a strati incrociati. Infatti il termine *Platform Frame* che può essere tradotto dall'inglese in "sistema intelaiato a piattaforma", sta a significare che anche per questo sistema una volta realizzate le strutture del primo solaio, queste fanno da *piattaforma* per la realizzazione dei piani successivi.
L'origine del sistema costruttivo, che non è altro che una derivazione del *Balloon Frame* che si distingue dal Platform per l'altezza delle pareti (che nel Balloon è di due piani e nel Platform di un piano), risale all'epoca della colonizzazione dell'America settentrionale da parte degli europei avvenuta nella prima metà dell'ottocento; il metodo costruttivo, con la struttura portante formata da telai costituiti da elementi di piccola sezione e leggeri, rispondeva infatti alla necessità di costruire velocemente nuovi insediamenti nei territori sottratti alle popolazioni indigene.
In Nordamerica il sistema è più conosciuto come *wood-frame* o *light wood-frame* o meglio *2by4* (denominazione commerciale con la quale viene indicata la sezione tipica degli elementi che costituiscono l'intelaiatura di pareti e solai ossia 2x4 pollici). Non si tratta, al contrario di quanto molti pensano, di un sistema prefabbricato (benché talvolta venga parzialmente prefabbricato), ma di un sistema costruttivo che generalmente viene realizzato interamente a piè d'opera secondo regole costruttive ben note e codificate.
La costruzione di un edificio fatto con il sistema Platform parte dalle **fondazioni** che, come per gli edifici a pannelli portanti possono essere realizzate o con una platea o con travi rovesce in c.a., oppure anche, nel caso di edifici di minore importanza, con plinti di fondazione isolati ai quali vengono collegate, lasciando una intercapedine da terra di almeno 10-15 cm, le travi dell'orditura del solaio del piano terra, oppure ancora realizzando dei piccoli cordoli di fondazione con muretti di mattoni e quindi un solaio di laterocemento. In ogni caso, essendo un sistema

costruttivo molto leggero (rispetto al sistema a pannelli portanti visto in precedenza, uno stesso edificio realizzato con il sistema Platform pesa circa un terzo), le dimensioni delle strutture di fondazione risultano molto contenute.
Sopra la fondazione vengono issate **le pareti**, completamente costruite a piè d'opera (Figura 5.15), costituite come detto da un'intelaiatura di montanti di legno massiccio di sezione generalmente di 4x9 o 5x10 cm, posti ad un interasse variabile fra 40 e 60 cm e completati da un corrente inferiore e un corrente superiore, di uguale sezione, inchiodati ai montanti. L'interasse dei montanti delle pareti è sempre un sottomultiplo della larghezza del pannello di rivestimento strutturale che generalmente ha delle dimensioni commerciali di 1200x2400 mm o 1220x2440 mm. La sezione può essere ovviamente anche maggiore in funzione dei carichi o del maggiore spessore di isolante previsto, che viene posizionato all'interno dell'intercapedine delle pareti.

Figura 5.15: Montaggio di una parete a piè d'opera e collegamento alla fondazione.

Sul lato esterno dell'intelaiatura (in alcuni casi, per esigenze strutturali, su entrambi i lati) viene inchiodato il rivestimento portante, formato generalmente da compensato strutturale, avente spessore di 12 mm al piano terra e 9,5 mm ai piani superiori, oppure con altri pannelli strutturali a base di legno quali ad esempio l'OSB.
I chiodi utilizzati sono ad aderenza migliorata generalmente con gambo da 3 mm di diametro, posti a un interasse solitamente di 15 cm sui bordi dei pannelli e di 30 cm sui montanti interni, quando non diversamente indicato dai calcoli di progetto. Occorre fare attenzione alle prescrizioni contenute nelle norme relativamente alle distanze dai bordi del pannello e all'interasse degli elementi di collegamento. È generalmente buona norma, soprattutto nel caso di utilizzo di pannelli di OSB, distanziare i pannelli l'uno dall'altro lungo i bordi di qualche millimetro, in modo da lasciare libere le variazioni dimensionali causate dai fenomeni di ritiro e rigonfiamento.

Le pareti vengono poi collegate fra loro da un ulteriore corrente superiore, sempre della medesima sezione unificata, che svolge la funzione di cordolo di collegamento.
Il rivestimento interno della parete, quando non si preveda per esigenze strutturali la presenza di un secondo foglio di compensato, è realizzato generalmente con pannelli di cartongesso (Figura 5.16).
Il collegamento delle pareti alle fondazioni, come per gli edifici a pannelli portanti, deve svolgere la duplice funzione di contrastare il ribaltamento e lo scorrimento delle pareti per effetto delle azioni orizzontali. Per il ribaltamento vengono utilizzati sempre gli hold-down collegati alle fondazioni con barre filettate inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica e ai montanti delle pareti con chiodi o viti. Lo scorrimento viene contrastato sempre con tirafondi che collegano il corrente inferiore della parete alla fondazione.

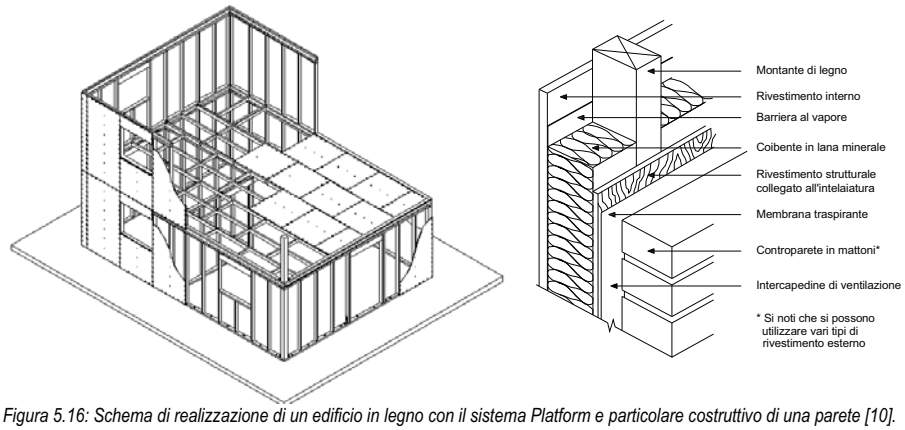

Montante di legno
Rivestimento interno
Barriera al vapore
Coibente in lana minerale
Rivestimento strutturale collegato all'intelaiatura
Membrana traspirante
Controparete in mattoni*
Intercapedine di ventilazione
* Si noti che si possono utilizzare vari tipi di rivestimento esterno

Figura 5.16: Schema di realizzazione di un edificio in legno con il sistema Platform e particolare costruttivo di una parete [10].

Una volta realizzate le pareti viene costruito **il solaio,** generalmente con travetti equispaziati allo stesso interasse dei montanti delle pareti o, se le luci e i carichi lo richiedono, travi reticolari realizzate con la stessa sezione unificata o travi di legno lamellare. Il solaio viene poi irrigidito nel proprio piano ancora con il posizionamento di pannelli di legno strutturale (compensato o OSB di 12 mm di spessore generalmente) collegato all'intelaiatura del

solaio con chiodi sempre di 3 mm di diametro posti ad interasse di 15 cm sui bordi esterni dei pannelli e a 30 cm di interasse sui supporti interni.

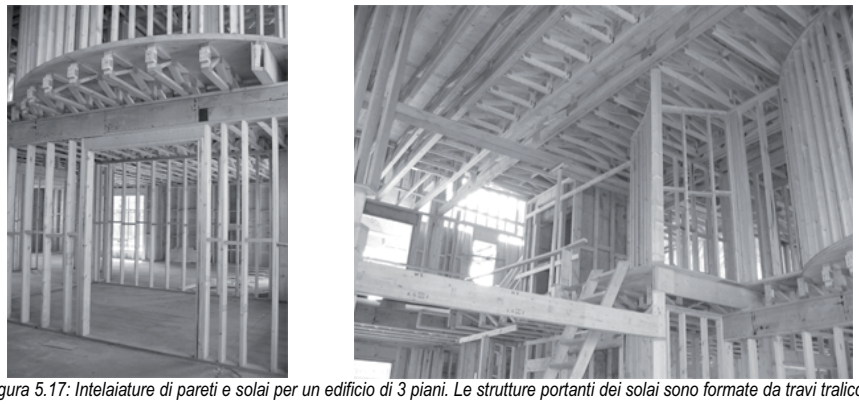


Figura 5.17: Intelaiature di pareti e solai per un edificio di 3 piani. Le strutture portanti dei solai sono formate da travi tralicciate formate da elementi della stessa sezione degli elementi delle pareti uniti con piastre chiodate.

Lungo tutto il perimetro del solaio va previsto un cordolo di collegamento in grado di riassorbire gli sforzi di trazione che nascono quando lo stesso solaio, assunto nei calcoli come diaframma rigido, viene caricato dalle azioni orizzontali nel proprio piano. Occorrerà per lo stesso motivo dimensionare opportunamente il collegamento dei pannelli di rivestimento al cordolo. Il collegamento del solaio alle pareti sottostanti e quello verticale delle pareti andrà realizzato in maniera tale da essere molto rigido e non rappresentare un punto di debolezza della struttura (Figura 5.17).
Anche per il sistema Platform, una volta realizzate le strutture del primo solaio, queste fanno da piattaforma per la realizzazione dei piani successivi. Il collegamento delle pareti dei piani successivi al solaio di interpiano avviene sempre con la stessa metodologia vista per il sistema a pannelli portanti, ossia hold-down interni o bande forate esterne per il ribaltamento e viti di collegamento del corrente inferiore delle pareti superiori al solaio inferiore per lo scorrimento.

La **copertura** viene solitamente realizzata con travi e travetti posti allo stesso interasse dei montanti delle pareti. Nella tradizione costruttiva nordamericana vengono solitamente utilizzate travi reticolari formate da elementi della stessa sezione unificata utilizzata per le pareti e collegati fra loro con piastre chiodate. Nel nostro paese più frequentemente si preferisce realizzare una copertura tradizionale a travi, oppure anche una copertura a capriate ma utilizzandone poche, magari con schema palladiano e giunti di carpenteria, poste ad interasse maggiore e realizzate con sezioni di dimensione maggiore, avendo comunque l'accortezza di raddoppiare o triplicare i montanti delle pareti in corrispondenza degli appoggi sulle pareti (Figura 5.18).

Figura 5.18: Copertura con travi reticolari collegate con piastre chiodate e copertura con capriate palladiane.

Il **pacchetto costruttivo** delle pareti viene completato mediante il posizionamento dell'isolante all'interno dell'intercapedine dell'intelaiatura. L'isolante è generalmente costituito da fibra di vetro o lana di roccia; dalla parte calda di quest'ultimo viene posizionata la barriera al vapore. In alternativa si può prevedere l'utilizzo di isolanti rigidi quali il polistirene estruso o il sughero. Lo strato isolante posto nell'intercapedine può occupare tutto lo spessore, nel qual caso il posizionamento degli impianti avviene in fresature ricavate nell'isolante oppure solo una parte lasciando un'intercapedine. Nel caso in cui sia necessario per esigenze strutturali collegare il pannello di legno strutturale ad entrambi i lati dell'intelaiatura, il rivestimento interno viene realizzato lasciando una intercapedine interna per il passaggio degli impianti chiusa con pannelli di cartongesso. Sul lato freddo viene

solitamente realizzata una coibentazione a cappotto sempre con lana di legno o sughero e/o con pannelli di lana di legno mineralizzata mentre il rivestimento esterno può essere intonacato o in doghe di legno (Figura 5.19).

Figura 5.19: Posizionamento dell'isolante all'interno dell'intercapedine delle pareti (foto Valerio Rao).

I solai vengono completati sopra il pannello di rivestimento strutturale con un massetto in cls porta-impianti, con un eventuale strato di isolamento acustico in gomma o con pannelli anticalpestio ed infine con la pavimentazione che può essere posata su una ulteriore caldana di calcestruzzo. In questo sistema costruttivo, in particolar modo nella realizzazione di edifici multipiano, diventa particolarmente importante il problema dell'isolamento acustico nei solai di interpiano, accentuato dalla leggerezza del pacchetto strutturale.
Il pacchetto costruttivo della copertura, realizzata con capriate o con trave di colmo e travi secondarie e sovrastante pannello di rivestimento strutturale inchiodato all'orditura, viene realizzato allo stesso modo del sistema costruttivo a pannelli. Per i dettagli costruttivi di pareti, solai e copertura si rimanda ancora al §5.7.

EDIFICI A TRAVI E PILASTRI

A differenza del cemento armato e dell'acciaio, il sistema intelaiato a travi e pilastri in legno (in inglese noto come sistema *Post&Beam*) necessita, per motivi di carattere strutturale, dell'uso di elementi di irrigidimento della maglia costruttiva sia nel piano verticale che in quello orizzontale.
La presenza di elementi di controvento, che possono essere realizzati con aste di legno, con pannelli strutturali a base di legno, o con croci in acciaio che non devono necessariamente coprire tutti i campi della maglia strutturale, diventa nello stesso tempo, un elemento insieme architettonico e strutturale, che caratterizza e differenzia i sistemi intelaiati in legno dalle analoghe realizzazioni con altri materiali.

Figura 5.20: Diverse tipologie di controventi in edifici in legno a travi e pilastri (foto Valerio Rao).

Origini e caratteristiche generali

Il sistema ha origini antichissime, ed è forse il primo ad essere stato utilizzato per la realizzazione di edifici a struttura di legno. L'architettura tradizionale dell'estremo oriente è piena di splendidi esempi di edifici intelaiati, realizzati tutti con unioni di carpenteria fra i vari elementi costruttivi, molti dei quali sono sopravvissuti indenni a secoli di terremoti catastrofici. Anche in Europa, e precisamente in Norvegia, esistono splendidi esempi di chiese a struttura intelaiata interamente di legno, note come *Stav Kirke*, alcune delle quali superano i mille anni di vita.

Figura 5.21: Edificio principale del tempio di Yakushi-ji a Nara (Giappone) e particolare di un nodo fra pilastro e trave.

In questi paesi la tradizione costruttiva dell'edificio intelaiato a struttura di legno è sopravissuta rivista e rivisitata con le moderne tecnologie. La moderna versione di questo sistema prevede la realizzazione di una gabbia strutturale con elementi trave e pilastro a sezione quadrata o rettangolare, talvolta formati da un doppio elemento, e giuntati tra loro sia attraverso giunti di carpenteria realizzanti mediante macchine a controllo numerico, sia attraverso elementi meccanici di collegamento quali viti, bulloni, spinotti, scarpe metalliche e piastre sempre in acciaio. Con questo sistema costruttivo è possibile realizzare edifici fino a tre o quattro piani; sovente viene utilizzato per la realizzazione di edifici commerciali o pubblici, vista l'ampia libertà che il sistema offre nella possibilità di distribuzione degli spazi interni.
Le strutture di **fondazione** vengono realizzate sempre o con una platea di fondazione in c.a., oppure, nella costruzione di edifici più importanti, con travi rovesce di fondazione in c.a. o talvolta anche con plinti di fondazione isolati sotto i pilastri connessi da cordoli di collegamento.

Figura 5.22: Edificio commerciale con fondazione su plinti in c.a. (fonte www.cwc.ca).

La differenza dal punto di vista statico rispetto ad edifici di tipologia analoga realizzati in cemento armato o acciaio sta nel fatto che, contrariamente a questi ultimi, con il legno è praticamente impossibile realizzare dei collegamenti rigidi fra i vari elementi strutturali che funzionino come veri e propri incastri. Questo comporta la necessità di irrigidire la maglia strutturale sia in orizzontale che in verticale, per rendere capace l'intero sistema di assorbire le azioni orizzontali (vento, sisma) e trasmetterle alle fondazioni.
L'irrigidimento delle **pareti** può essere realizzato o mediante controventi in legno o acciaio o ancora mediante il posizionamento di pannelli di rivestimento in compensato o di OSB chiodati agli elementi portanti delle pareti.
In ogni caso anche riuscendo a realizzare un sistema con nodi perfettamente rigidi, il problema della limitazione della deformabilità orizzontale del sistema comporterebbe l'utilizzo di sezioni eccessive per i pilastri, tali quindi da rendere comunque preferibile la soluzione con i controventi.
Per quanto riguarda gli **orizzontamenti**, un buon livello di irrigidimento nel piano può essere raggiunto mediante l'utilizzo di travi o travetti posti ad interasse ravvicinato e il posizionamento, sopra di essi, di un foglio singolo o anche doppio di compensato strutturale da 12 mm collegato all'orditura del solaio con chiodi come per il sistema

Platform e mediante l'utilizzo di controventi continui o a croce tra i travetti realizzati con elementi di legno o acciaio. Talvolta sopra il compensato viene realizzata una soletta di calcestruzzo alleggerito di 5 cm che, oltre ad avere la funzione di irrigidire ulteriormente il solaio svolge, anche la funzione di migliorarne l'isolamento acustico, aumentando la massa del solaio, e di consentire il posizionamento degli impianti. L'irrigidimento verticale viene realizzato solitamente mediante l'utilizzo di controventi in legno o in acciaio che possono essere lasciati a vista o possono essere nascosti all'interno delle pareti, oppure mediante pannelli strutturali di rivestimento in compensato o OSB.

I **particolari costruttivi** in questo sistema sono fondamentali, soprattutto riguardo al problema della resistenza al fuoco. Anche se il requisito di resistenza al fuoco non è richiesto per edifici residenziali di altezza inferiore ai 12 m, in ogni caso è buona pratica costruttiva proteggere tutti gli elementi di collegamento fra i vari elementi strutturali, comprese le piastre, le squadrette e le scarpe d'acciaio dall'azione diretta del fuoco. A tale scopo un buon stratagemma è rappresentato dalla realizzazione di unioni che prevedono l'inserimento delle piastre metalliche all'interno degli elementi di legno da collegare in fresature appositamente realizzate, o comunque la protezione delle unioni con fogli di compensato o con tappi di legno in modo che queste non rimangano a vista.

Occorre inoltre proteggere tutte le unioni dalla possibilità di ristagno d'acqua, soprattutto nel caso del collegamento dei pilastri alle fondazioni; a tale scopo è bene, se possibile, evitare l'utilizzo di scatole o cuffie di metallo che racchiudano il piede del pilastro al loro interno, mentre sono da preferire dispositivi di unione che prevedano l'inserimento di piastre in apposite fresature realizzate nel piede del pilastro. Comunque nel caso in cui non si voglia fare a meno dell'utilizzo di scatole chiuse è bene prevedere dei fori nella base della scatola in modo tale da permettere all'acqua eventualmente penetrata, di fuoriuscire.

I **pacchetti costruttivi** per pareti, solai e copertura sono gli stessi visti per i sistemi costruttivi precedenti. La struttura portante verticale e orizzontale viene lasciata a vista all'interno dell'edificio. La parte esterna dell'edificio è rivestita con pareti di tamponamento che frequentemente hanno le stesse caratteristiche costruttive del sistema Platform, ossia intelaiatura con isolante inserito nell'intercapedine e rivestimento con pannelli che possono non essere in questo caso strutturali ma di semplice rivestimento (cartongesso). I controventi possono essere lasciati a vista oppure rimanere nascosti all'interno del pacchetto costruttivo della parete.

EDIFICI A BLOCCHI MASSICCI O A TRONCHI

Commercialmente il sistema è più conosciuto con il nome di *Blockhaus* o *Log House* essendo molto diffuso in Europa Centro-Settentrionale e in Nordamerica. È un sistema costruttivo tipico dei paesi nordici per la realizzazione di edifici per abitazione mono familiari di 1-2 piani.

Figura 5.23: Esempi di edifici a blocchi massicci (catalogo Kontio Log-House, Finlandia).

Il sistema, molto semplice, si contraddistingue per le modalità di realizzazione delle pareti, formate dalla sovrapposizione di tronchi di legno massiccio tondi o squadrati, generalmente sagomati nella parte superiore e inferiore al fine di aumentare la superficie di contatto; il materiale è utilizzato con una funzione non dissimile dalla muratura. Per le sue caratteristiche architettoniche il sistema è sicuramente più adatto alla realizzazione di abitazioni isolate immerse nel verde o comunque di edifici per abitazione in piccoli centri montani.

Origini e caratteristiche generali

Anche questa tipologia costruttiva ha origini antichissime risalenti addirittura alla preistoria. Le **fondazioni**, come per tutti i sistemi costruttivi visti finora, vengono realizzate solitamente con una platea o con travi rovesce in c.a. Occorre, come per il sistema a pannelli portanti, fare attenzione al particolare del contatto pareti-fondazione prevedendo la realizzazione di un cordolino aggiuntivo in c.a. nel caso di platea e del posizionamento di uno strato di guaina al contatto con le stesse fondazioni.

I tronchi di legno che costituiscono le **pareti** sono generalmente realizzati con una scanalatura semplice, doppia o tripla nella parte inferiore e superiore, per facilitarne la sovrapposizione in modo da conferire maggiore solidità e

rigidità alla parete stessa, e creando una protezione naturale all'eventuale penetrazione dell'acqua meteorica. In alternativa, o in aggiunta, il sistema di collegamento tra i tronchi è completato mediante l'inserimento di biette o tasselli di legno di latifoglia, e in ogni caso mediante l'inserimento di tiranti a vite in acciaio all'interno di appositi fori realizzati ad intervalli di circa 1,5-2,0 m, con la funzione di tenere insieme l'intero pacchetto parete. È comunque sempre opportuno inserirne uno in corrispondenza di ogni estremità della parete e in corrispondenza delle aperture, in modo che svolga anche la funzione di elemento di presidio al ribaltamento.

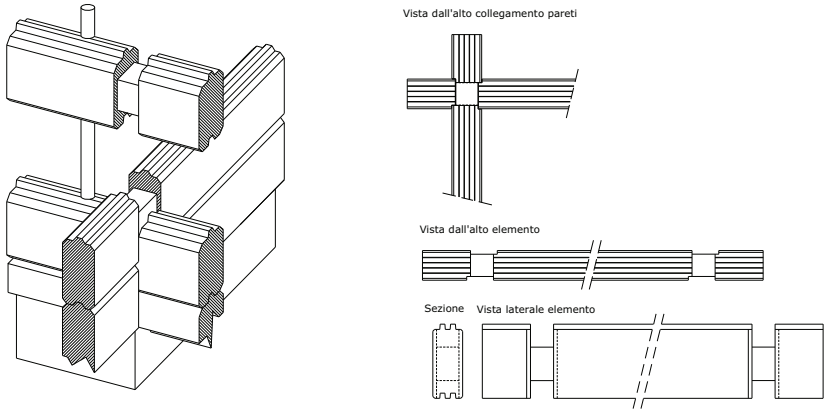


Figura 5.24: Montaggio pareti e dettaglio costruttivo sagomatura tronchi.

L'incrocio fra elementi di pareti ortogonali, ripetuto più volte nello schema costruttivo, oltre a rappresentare un elemento architettonico fortemente caratterizzante, conferisce stabilità all'intero edificio e capacità di resistere alle azioni orizzontali. È realizzato mediante la lavorazione dei tronchi che costituiscono le pareti con macchine a controllo numerico che consentono la sagomatura di apposite maschiature per l'incastro dei pezzi.

L'ancoraggio alle fondazioni è realizzato mediante dei tirafondi affogati nella stessa fondazione ed assicurati sulla parete da un dado con rondella che fungono da elementi di presidio allo scorrimento.

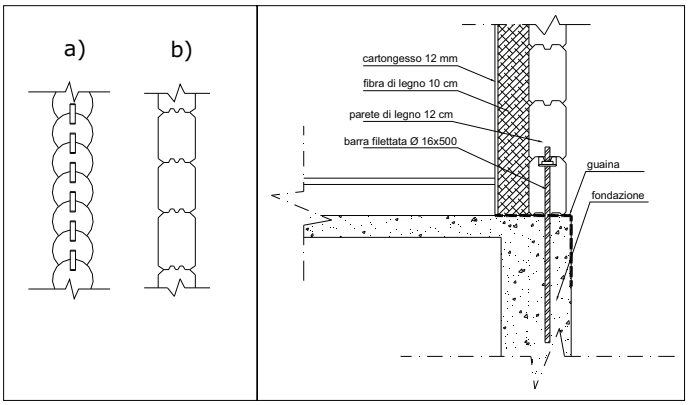


Figura 5.25: Due diverse tipologie di parete: a, con tronchi tondi e biette di collegamento, b, con blocchi squadrati e collegamento con sagomatura cuneiforme doppia. A destra collegamento della parete alle fondazioni.

L'impianto planimetrico è piuttosto semplice, generalmente a pianta rettangolare; i **solai** intermedi sono costituiti da travi o travetti in legno massiccio o lamellare che poggiano su due pareti ortogonali o, talvolta, su dei pilastri in legno massiccio o lamellare. L'orditura della **copertura** è anch'essa semplice, solitamente costituita da un tetto a due falde con la trave di colmo parallela al lato più lungo dell'edificio e travetti che poggiano su quest'ultima e sulle pareti longitudinali parallelamente alla linea di falda.
Il **pacchetto costruttivo** della parete può essere completato in due modi: o lasciando il legno a vista all'esterno dell'edificio e quindi inserendo l'isolante dal lato interno e chiudendo internamente con il cartongesso, oppure lasciando il legno a vista internamente ed inserendo un cappotto isolante esterno completato dall'intonaco o altro

rivestimento. Come materiale isolante vengono utilizzati solitamente, come per tutti i sistemi costruttivi visti finora, isolanti naturali a base di legno quali la fibra di legno o di canapa e il sughero.
Il pacchetto costruttivo del solaio e della copertura è lo stesso visto per i sistemi costruttivi visti in precedenza, trattandosi della stessa tecnica costruttiva.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Edifici a struttura di legno in genere

[10] Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P. (2006), *Le strutture di legno in zona sismica - Criteri e regole per la progettazione ed il restauro* II ediz., CLUT, Torino.
[1] Berti S., Piazza M., Zanuttini R. (2002), *Strutture di legno per un'edilizia sostenibile,* Il Sole 24Ore, Milano.
[2] A VV (2003), *Il legno massiccio in edilizia*, Federlegno-Arredo s.r.l., Milano.
[3] Benedetti C., Bacigalupi V. (1991), *Legno Architettura– Il futuro della tradizione*, Edizioni Kappa, Roma.
[4] Canadian Wood Council – www.cwc.ca

Edifici Platform Frame

[5] Benedetti C. (1984), *Le costruzioni in legno – L'esperienza canadese*, Edizioni Kappa, Roma.

Edifici Intelaiati

[6] Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, Università di Firenze, Candidata: Laura Calabri , Relatori: Spinelli P., Orlando M., Lauriola M. P. (2008), *Studio sulla fattibilità di strutture intelaiate in legno in zona sismica e progetto di applicazione ad un edificio scolastico.*